

Periodical Part, Published Version

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)

BAWMerkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102451>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

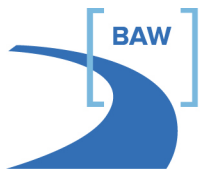
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): BAWMerkblatt Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

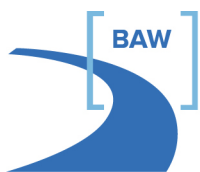


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAWMerkblatt

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)

Ausgabe 2010



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

BAW-Merkblätter und -Richtlinien

Herausgeber

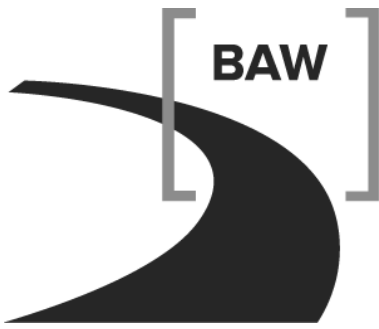
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

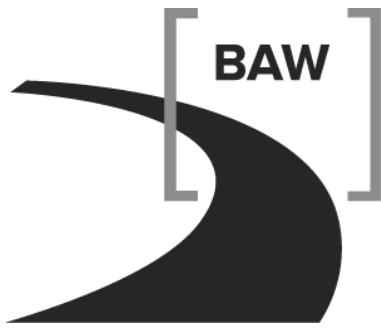
Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2011



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Grundlagen zur Bemessung
von Böschungs- und
Sohlensicherungen
an Binnenwasserstraßen
(GBB)**

Ausgabe 2010



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)

Herausgeber (im Eigenverlag): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe · Telefon (0721) 9726-0 · Telefax (0721) 9726-4540
E-Mail: info.karlsruhe@baw.de · Internet: <http://www.baw.de>
Nachdruck, Übersetzung oder sonstige Vervielfältigung, auch auszugsweise,
ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.
© BAW 2011

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen

Stand: März 2011

Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter:

ABROMEIT, Uwe	BOR, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (bis 2005)
ALBERTS, Dirk	Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg († 2005)
BARTNIK, Wolfgang	LBDiR, Wasserstraßen-Neubauamt Datteln ¹⁾
FISCHER, Uwe	BDir, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen Bonn ¹⁾
FLEISCHER, Petra	BOR, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
FUEHRER, Manfred	Dr. rer. nat., ehem. Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (bis 2000)
GESING, Carolin	Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe ²⁾
HEIBAUM, Michael	LTRDiR, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe ¹⁾
HOLFELDER, Tilman	Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (bis 2008)
KAYSER, Jan	BDir, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
KNAPPE, Gerd	Dipl.-Ing., Wasserstraßen-Neubauamt Datteln ¹⁾
KÖHLER, Hans-Jürgen	Dipl.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (bis 2006)
LIEBRECHT, Arno	Dipl.-Ing., Wasser- und Schifffahrsdirektion Mitte Hannover ¹⁾
REINER, Wilfried	LBDiR, Wasser- und Schifffahrsdirektion Mitte Hannover ¹⁾
SCHMIDT-VÖCKS, Dieter	LBDiR a. D., Wasser- und Schifffahrsdirektion Mitte Hannover (bis 2000)
SCHULZ, Hartmut	Prof. Dr.-Ing., Universität der Bundeswehr München (bis 1996)
SCHUPPENER, Bernd	LBDiR, Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (1996 bis 2009)
SÖHNGEN, Bernhard	BDir Prof. Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe
SOYEAX, Renald	Dr.-Ing., Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe

¹⁾ Mitarbeit am GBB 2004

²⁾ Mitarbeit am GBB 2010

Inhalt

1	Vorbemerkung	7
1.1	Entwicklung des GBB	7
1.2	Anwendungsbereich	7
1.3	Struktur	8
2	Begriffe	10
3	Übersicht der hydraulischen Belastungen des Gewässerbetts	16
3.1	Allgemeines	16
3.2	Strömungen	16
3.3	Wellen	16
3.3.1	Allgemeines	16
3.3.2	Form und Wirkung der Welle am Ufer	18
3.4	Wirkung des Wasserspiegelabsunks	18
3.4.1	Allgemeines	18
3.4.2	Langsam fallender Wasserspiegel	19
3.4.3	Schnell fallender Wasserspiegel	19
3.5	Grundwasserzustrom	20
4	Sicherheits- und Bemessungskonzept	21
4.1	Allgemeines	21
4.2	Hydraulische Nachweise	22
4.2.1	Aspekte zur Festlegung der Bemessungsgrößen	22
4.2.2	Empfehlungen für die hydraulische Bemessung	23
4.2.2.1	Primärwellenfeld	23
4.2.2.2	Sekundärwellenfeld	25
4.2.2.3	Schraubenstrahl	25
4.2.2.4	Empfehlungen für die hydraulische Bemessung im Regelfall	26
4.3	Geotechnische Nachweise	26
5	Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen	28
5.1	Allgemeines	28
5.2	Daten zur Wasserstraße	29
5.2.1	Gewässergeometrie	29
5.2.2	Fahrrinnengeometrie	29
5.2.3	Wasserstand	29
5.3	Daten zum Schiff	29
5.4	Schiffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen	31
5.4.1	Komponenten	31

5.4.2	Fahrsituationen	31
5.4.2.1	Normalfahrt	31
5.4.2.2	Manövrierfahrt	32
5.5	Größe von Schiffswellen (Bemessungssituation "Normalfahrt")	34
5.5.1	Hydraulisch wirksamer Kanal- bzw. Schiffsquerschnitt	35
5.5.1.1	Flachwassereinfluss	35
5.5.1.2	Grenzschichteinfluss	43
5.5.2	Kritische Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt	44
5.5.3	Mittlerer Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit bei mittiger Kanalfahrt	47
5.5.4	Hydraulische Bemessungsgrößen und geotechnisch maßgebende Absunkparameter bei beliebiger Fahrposition	52
5.5.4.1	Definition der Wellenhöhe	52
5.5.4.2	Maximaler Wasserspiegelabsunk am Bug und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss	52
5.5.4.3	Maximaler Wasserspiegelabsunk am Heck und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss	53
5.5.4.4	Maximalwerte von Bug- und Heckwellenhöhe bei exzentrischer Fahrt	54
5.5.4.5	Wiederauffüllungsströmung	55
5.5.4.6	Ermittlung der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeiten in Ufernähe bei Grundströmung	58
5.5.4.7	Vergrößerung der Wellenhöhen bei Fahrt mit Driftwinkel	59
5.5.4.8	Absunk von Schiffswellen	61
5.5.5	Sekundärwellen	64
5.5.5.1	Allgemeines	64
5.5.5.2	Berechnung der Sekundärwellenhöhen	67
5.5.5.3	Zusätzliche Sekundärwellen in Analogie zum unvollkommenen Wechselsprung	69
5.5.5.4	Sekundärwellen kleiner Boote bei Gleitgeschwindigkeit und ufernaher Fahrt	70
5.5.5.5	Wellenaufbau	73
5.5.6	Begegnung und Überholung	76
5.6	Hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmung (Schraubenstrahl)	76
5.6.1	Induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls im Stand (Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s = 0$)	76
5.6.2	Geschwindigkeit des Propellerstrahls bei Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s \neq 0$	79
5.6.3	Strahlausbreitungscharakteristik	81
5.6.3.1	Standardsituationen zur Strahlausbreitung	81
5.6.3.2	Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit	83
5.6.3.3	Berechnung der Strahlgeschwindigkeitsverteilung quer zur Strahlachse	86
5.6.3.4	Mehrschraubenantriebe	89
5.6.4	Vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit	89
5.6.5	Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes	90
5.6.6	Belastung durch Bugstrahlruder	92
5.7	Wellen allgemein, Wellenverformung und Wasserstände	94

6	Hydraulische Bemessung ungebundener Deckschichten aus Wasserbausteinen	95
6.1	Allgemeines	95
6.2	Steingröße bei Belastung durch Heckquerwellen	95
6.3	Steingröße bei Propulsionsströmung	96
6.3.1	Steingröße bei Strahlangriff	96
6.3.2	Steingröße zur Begrenzung der Kolkentiefe infolge Schraubenstrahl	98
6.4	Steingröße bei Belastung durch Sekundärschrägwellen	99
6.5	Steingröße bei Windwellen bzw. kombinierter Schiffs- und Windwellen-belastung	99
6.6	Steingröße bei Strömungsangriff	99
6.6.1	Steingröße bei weitgehend böschungsparallelem Strömungsangriff	100
6.6.2	Steingröße bei Böschungsbelastung durch Wiederauffüllungsströmung	101
6.7	Steingröße unter Berücksichtigung aller Belastungsarten	102
6.8	Steingrößen und Steinklassen	102
6.9	Mindestdicke der Deckschicht	105
6.9.1	Mindestdicke als Grundlage der Steinbemessung	105
6.9.2	Mindestdicke wegen Schutzfunktion der Deckschicht	106
6.10	Mindestlänge des Deckwerks in Böschungsfalllinie (Teildeckwerk)	107
6.10.1	Allgemeines	107
6.10.2	Oberhalb des Ruhewasserspiegels	107
6.10.3	Unterhalb des Ruhewasserspiegels	107
7	Geotechnische Bemessung von ungebundenen Deckschichten	109
7.1	Grundlagen der Bemessung	109
7.1.1	Allgemeines	109
7.1.2	Maximaler schneller Wasserspiegelabsenk z_a	109
7.1.3	Größe des Porenwasserüberdrucks Δu	110
7.2	Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke	112
7.2.1	Allgemeines	112
7.2.2	Hinweise zum Baugrund	113
7.2.3	Tiefenlage der kritischen Bruchfuge d_{krit}	113
7.2.4	Wichte der Deckschicht unter Auftrieb	113
7.2.5	Flächengewicht der Deckschicht gegen Abgleiten des Deckwerks auf einer Böschung	114
7.2.5.1	Allgemeines	114
7.2.5.2	Rechenverfahren	114
7.2.6	Flächengewicht der Deckschicht gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen	116
7.2.6.1	Allgemeines	116
7.2.6.2	Rechenverfahren	116
7.2.7	Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Fußstützung	116
7.2.7.1	Allgemeines	116
7.2.7.2	Bruchmechanismus 1 am Böschungsfußpunkt	117
7.2.7.3	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage	118

7.2.7.4	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung	122
7.2.7.5	Bruchmechanismus 2 bei einer Fußspundwand	124
7.2.8	Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung	126
7.2.8.1	Allgemeines	126
7.2.8.2	Nachweis der äußeren Tragfähigkeit	127
7.2.8.3	Nachweis der inneren Tragfähigkeit	128
7.2.9	Böschungssicherung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels	128
7.3	Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke	129
7.3.1	Allgemeines	129
7.3.2	Flächengewicht der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abheben	129
7.3.3	Flächengewicht der Deckschicht eines dichten Deckwerks ohne Fußstützung gegen Abgleiten	129
7.4	Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung	130
8	Hydraulische und geotechnische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss	131
8.1	Hydraulische Bemessung	131
8.2	Geotechnische Bemessung	131
8.2.1	Allgemeines	131
8.2.2	Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten	131
8.2.3	Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten	132
8.3	Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung	132
9	Literaturverzeichnis	133
10	Nomenklatur	142
10.1	Abkürzungen	142
10.2	Symbole	142

Anhänge

Anhang A	Rechenansätze für die geotechnische Bemessung zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichtes der Deckschichten
Anhang B	Flussdiagramm für die Durchführung der geotechnischen Bemessung
Anhang C	Ermittlung eines Ersatztrapezprofils
Anhang D	Veränderung der mittleren Rückströmungsgeschwindigkeit zwischen Schiff und Ufer bei schlanken Fahrzeugen und geringem Absunk
Anhang E	Allgemeine Strahlausbreitung für die Standardsituationen 1 und 2 und für $v_s = 0$

1 Vorbemerkung

1.1 Entwicklung des GBB

In der vorliegenden Schrift werden ausführlich die Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen unter Berücksichtigung neuester Forschungsergebnisse vorgestellt. Es werden rechnerische Nachweise zur Standsicherheit und Erosionsfestigkeit von Uferböschungen an Kanälen und, mit Einschränkungen, an Flüssen genannt, die natürlichen oder schiffahrtsbedingten hydraulischen Einwirkungen ausgesetzt sind.

Die erste Fassung des GBB wurde 2004 veröffentlicht /BAW 2004/, womit erstmals eine umfassende Grundlage für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen zur Verfügung stand. Seitdem wurde das GBB im Rahmen einer Vielzahl von Projekten zur Dimensionierung von Böschungs- und Sohlensicherungen erfolgreich und vielfältig angewendet.

Das „Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR)“ wurde auf der Grundlage des GBB überarbeitet, wofür umfangreiche Berechnung nach GBB durchzuführen waren. Das überarbeitete MAR wurde 2008 veröffentlicht /MAR 2008/. Mit dem MAR besteht die Möglichkeit, unter definierten Randbedingungen Böschungs- und Sohlensicherungen ohne weitere Berechnungen zu dimensionieren.

Des Weiteren entwickelte eine Arbeitsgruppe der BAW und WSV die Software GBBSoft /BAW 2008/, die im Jahr 2008 fertig gestellt wurde und die die einfache Anwendung des GBB ermöglicht. Weitere Erkenntnisse zur Bemessung ergaben sich innerhalb von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen und Modell- und Naturuntersuchungen.

Nach nunmehr 6jähriger intensiver Anwendung des GBB war eine Überarbeitung sinnvoll, um die Erfahrungen in der Anwendung und neue Erkenntnisse einzuarbeiten und um erkannte Fehler zu korrigieren. Im Rahmen der Überarbeitung ergaben sich folgende wesentliche Änderungen:

- Ergänzungen zu den Berechnungsgrundlagen zum Abklingen des Absunkes zwischen Schiff und Ufer
- Überarbeitung der Bemessungsformeln für die Kolkbildung aus Schraubenstrahl
- Verallgemeinerung der Strahlausbreitung bei Mehrschraubenantrieben
- Berücksichtigung von Fahrgeschwindigkeiten größer als die Gleitgeschwindigkeit bei Sportbooten
- Berücksichtigung unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten an Sohle und Ufer bei der Steingrößenbemessung
- Einführung eines Wichtungskonzepts zur Berücksichtigung unterschiedlicher Ansätze bei der Steinbemessung
- Präzisierere Strukturierung hinsichtlich geotechnischer und hydraulischer Berechnungen
- Zusammenfassung der Wirkungen unterschiedlicher Wellen und Entfall von Windwellen (*Erläuterung:* Diese Wellen rufen meist geringere Belastungen als schiffserzeugte Wellen hervor; sie sind selten bemessungsrelevant. Daher wird hier nur auf das GBB von 2004 verwiesen. Die entsprechenden Kapitel dort gelten unverändert.)
- Anpassung an Steinklassen nach /DIN EN 13383/
- Erweiterte Festlegung der Mindestdicken und Entfall hydraulisch gleichwertiger Deckschichtdicken
- Überarbeitung der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung
- Erweiterung der Anhänge zur besseren Verständlichkeit der theoretischen Hintergründe

Das überarbeitete GBB wird hiermit als GBB 2010 zur Verfügung gestellt.

1.2 Anwendungsbereich

Der **Anwendungsbereich** der hydraulischen Bemessungsansätze erstreckt sich in erster Linie auf Wasserstraßen mit vorwiegend parallelem Uferverlauf (prismatische Querschnitte), mit seitlich und tiefenmäßig begrenztem Fahrwasser, mit bis auf den Uferbereich nahezu konstanter Tiefe (keine Bermen), mit einem maximalen Verhältnis Wasserspiegelbreite/Schiffslänge von ca. $b_{WS}/L = 2/1$ und mit Schiffsverkehr in der für die Deckwerksbemessung maßgebenden Verdrängerfahrt (auch für Sportboote). Mit Einschränkungen können die vorgestellten Verfahren auch auf seeartige Kanalaufweitungen und staugeregelte Gewässer angewendet werden, wenn

die Schiffe ufernah fahren und wenn der Uferverlauf regelmäßig ist, d. h. keine „Ausbuchtungen“ oder Trichter aufweist, an und in denen sich schiffserzeugte Wellen aufstauen können. Mit diesen Einschränkungen kann der Einfluss der Uferform, der Turbulenz und der Grundströmung auf die Wellenausbreitung vernachlässigt werden. Der Flachwassereinfluss ($b_{WS}/L > 2/1$) kann hinsichtlich der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten und des Wasserspiegelabsinks in Schiffsnähe näherungsweise durch ein äquivalentes Kanalprofil berücksichtigt werden. Für das Abklingen der Wellenhöhen mit der Entfernung vom Schiff werden ebenfalls Näherungsgleichungen angegeben. Auch für die Fahrt von Sportbooten sowie kurzen, gedrunghenen Schiffskörpern (Schubboote und Schlepper) werden Näherungsverfahren zur Abschätzung der schiffserzeugten hydraulischen Belastungen angeboten.

Für die folgenden Situationen werden in Kap. 5 keine Berechnungsverfahren zur Ermittlung der hydraulischen Bemessungsparameter (Wellenhöhe, Strömungsgeschwindigkeit) angeboten:

- Stark ungleichförmige Gewässerquerschnitte bzw. Gewässer mit unregelmäßigem Uferverlauf
- Nicht-konventionelle Propulsionsorgane wie Schottel-Propeller und Strahlantriebe
- Nicht-Verdränger wie Luftkissenboote
- Seeschiffe und andere Fahrzeuge, die von der üblichen Bauart von Binnenschiffen abweichen, z. B. solche mit Bugwulst (sie bilden andere Sekundärwellen aus)
- Froudesche Tiefenzahlen $v_s / \sqrt{g h_m} > 0,8$
(hier ändert sich das Sekundärwellensystem signifikant)
- Fahrten, bei denen die Kursachse von der Kanalachse stark abweicht (dabei verändern sich die Primär- und Sekundär-Wellensysteme wesentlich)

Sollten Messdaten, z. B. zu den schiffserzeugten Wellenhöhen, vorliegen, können die darauf aufbauenden Bemessungsverfahren für die erforderliche Steingröße (s. Kap. 6) direkt angewendet werden.

Bei der Bemessung der Steingrößen in Kap. 6 werden die im Folgenden genannten Punkte nicht behandelt (die bodenmechanische Bemessung bleibt davon unbeeinflusst):

- Flachere Uferböschungen als ca. 1:5 (auf diesen werden ankommende Wellen signifikant verformt) und steilere als ca. 1:2
- Wellenverformungen im Böschungsbereich (sie werden aber indirekt in den Bemessungsverfahren, die sich auf Wellenhöhen am Böschungsfuß beziehen, berücksichtigt)
- Ufersicherungen mit Formsteinen, Gabionen oder Asphalt

1.3 Struktur

Das vorliegende GBB 2010 gliedert sich in drei wesentliche Teile:

- Im ersten Teil werden die verwendeten Begriffe definiert, die hydraulischen und bodenmechanischen Grundlagen erläutert und die Sicherheitsphilosophie und das Bemessungskonzept vorgestellt (s. Kap. 2 bis 4).
- Der zweite Teil befasst sich mit der Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen (s. Kap. 5), die die Eingangsparameter für die Bemessung darstellen.
- Der dritte Teil beinhaltet die hydraulischen und geotechnischen Bemessungen (s. Kap. 6 bis 8).

Die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen besteht aus einer hydraulischen und einer geotechnischen Bemessung (s. Bild 1.1). Beide Bemessungen sind unabhängig voneinander durchzuführen.

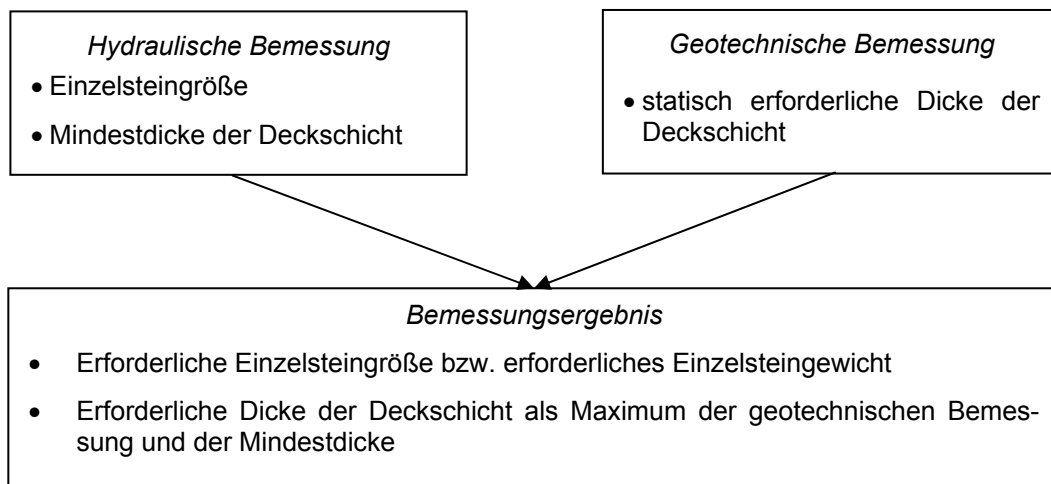


Bild 1.1 Hauptkomponenten der Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen

Bei der **hydraulischen Bemessung** wird die erforderliche Einzelsteingröße eines Deckwerks aus losen Wasserbausteinen in Abhängigkeit von der Wellen- und Strömungsbelastung ermittelt. Die **geotechnische Bemessung** dient der Bestimmung des erforderlichen Flächengewichts des Deckwerks, um eine ausreichende Sicherheit gegen Abgleiten, Abheben und hydrodynamische Bodenverlagerung zu gewährleisten. Zusätzlich ist der geotechnische Nachweis der Gesamtstandsicherheit der Böschung einschließlich Deckwerk zu führen.

Die Ergebnisse der hydraulischen und der geotechnischen Bemessung sind im letzten Schritt Grundlage für die Ermittlung der erforderlichen Mindestdicke der Deckschicht. Dabei ist zusätzlich zu überprüfen, ob ein ausreichender Schutz gegen Schiffsanfahrungen, gegen Ankerwurf und UV-Strahlung sowie eine ausreichende Filtrationslänge gegen Korntransport gewährleistet ist.

Die hier vorgestellten Verfahren gelten in Verbindung mit folgenden **Regelwerken** für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen jeweils in ihrer aktuellsten Fassung:

- Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungen und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen /MAR 2008/
- Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen /MAK 1989/
- Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen /MAG 1993/
- Merkblatt Anwendung von hydraulisch und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen /MAV 1990/
- Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine /TLW 2003/
- Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen /BMV 1994/

2 Begriffe

Abgleiten: Spezieller Fall des \Rightarrow Böschungsbruches auf einer oberflächennahen, böschungsp parallelen Gleitfläche.

Absunkgeschwindigkeit: Geschwindigkeit, mit der der Wasserspiegel an einem Uferpunkt im Mittel absinkt.

Bodenverlagerung, hydrodynamische: Die durch \Rightarrow Porenwasserüberdruck im Boden entstehende Strömung des Grundwassers aus der Böschung ins freie Wasser führt bei unzureichender Auflast zu Deformationen in der Böschung (Auflockerung des Bodens, Hebung) und kann nach Erreichen des plastischen Grenzzustandes (Mohr-Coulombsche Bruchbedingungen) durch entsprechend hohen Porenwasserüberdruck zu schädlichen Kornverlagerungen ggf. auch böschungsabwärts im Boden unterhalb der Deckschicht führen.

Böschungsbruch: Abrutschen eines Teils der Uferböschung auf einer i. d. R. tiefen Gleitfläche infolge des Ausschöpfens des Scherwiderstandes des Bodens.

Brechende Welle: \Rightarrow Wellenbrechen

Bugstau: Aufstau des Wassers vor dem Bug über die Einflussbreite, verursacht durch ein beschleunigendes Schiff bzw. bei stationärer Fahrt durch eine raue Kanalberandung (Wasserspiegelanspannung); tritt im Gegensatz zur \Rightarrow Bugwelle über eine große Breite (Kanalbreite) auf.

Bugstrahlruder: In einem senkrecht zur Schiffsachse im Bugbereich angeordneten Rohr befindet sich eine Schiffsschraube (Standardausführung), die Wasser beschleunigt. Dadurch wird ein Querimpuls ausgeübt, der wie ein Ruder wirkt. Die größte Wirkung tritt bei kleinen Schiffsgeschwindigkeiten über Grund auf.

Bugwelle: Aufstau des anströmenden Wassers direkt vor dem Bug des Schiffes (Staupunkt), der die Bildung von \Rightarrow Sekundärwellen zu beiden Schiffsseiten hin initiiert.

Deckschicht: Die oberste Schicht eines \Rightarrow Deckwerks. Sie muss erosionsfest sein und gegen Ankerwurf und Schiffsanfahrung einen ausreichenden Widerstand besitzen.

Deckwerk: Durchlässige oder dichte Auskleidung eines Gewässers zur Verhinderung von Veränderungen des Gewässerbetts.

Ein durchlässiges Deckwerk ermöglicht den ungehinderten Wasseraustausch zwischen Untergrund und Wasserstraße. Es besteht i. Allg. aus einer Deckschicht und einem darunter liegenden Filter.

Ein dichtes Deckwerk verhindert den Wasseraustausch zwischen Wasserstraße und Untergrund. Es besteht aus einer dichten Deckschicht - i. Allg. mit einer darunter liegenden geotextilen Trennlage - oder aus einer durchlässigen Deckschicht auf einer darunter liegenden Weichdichtung - i. Allg. mit einer Trennlage als Zwischenlage.

Diffraktion: Trifft eine Wellenfront auf ein Hindernis, so hat das Wellenbeugung (Diffraktion) zur Folge. Da jeder Punkt eines Wellenkammes Ausgangspunkt neuer kreisförmiger Elementarwellen ist, werden am wellenexponierten Ende des Hindernisses Wellen erzeugt, die sich im Wellenschatten hinter dem Hindernis ausbreiten. Die Geschwindigkeit bleibt dabei unverändert. Wellenhöhe und -richtung dagegen verändern sich an den offenen Rändern.

Düsenpropeller (Mantelpropeller): Zylinderförmig ummantelter Propeller zur Wirkungsgradsteigerung.

Einflussbreite (\sim , wirksame): Die wirksame Einflussbreite b_E entspricht derjenigen Breite, in der man sich das gesamte Rückstromfeld um ein Schiff konzentriert denken kann. Sie erlaubt die Berechnung der Maximalwerte von Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit der Flachwasserfahrt in einem äquivalenten Gewässerquerschnitt dieser Breite.

Fahrdynamisches Einsinken (Squat): Schiffshydrodynamischer Effekt eines Schiffes in Fahrt. Das Binnenschiff fährt im Bereich des abgesenkten Wasserspiegels (\Rightarrow Wasserspiegelabsunk) und sinkt deshalb gegenüber der Ruhelage ein (s. Bild 2.1). Zusätzlich führen lokale Spitzen der Umströmungsgeschwindigkeit aus Krümmungen der Schiffskontur und an den Schiffsantrieben zu Unterdrücken, die den Schiffskörper an Bug und Heck unterschiedlich stark an die Sohle ansaugen. Dadurch vergrößert oder verkleinert sich der Squat und das Schiff kann vertrimmen (\Rightarrow Vertrimmung).

Flachwasser: Tiefenmäßig beschränktes, seitlich unbeschränktes Fahrwasser; im Gegensatz zum \Rightarrow Tiefwasser wird die Wellenbewegung durch geringe Wassertiefe beeinflusst (\Rightarrow Wellenverformung). Die seitliche Wellenbewegung kann ungehindert abklingen (Situation in breiten, freifließenden Gewässern).

Hinsichtlich der Wellenform beginnt der Flachwassereinfluss bei einem Verhältnis Wellenlänge L zur mittleren Wassertiefe h_m von $L/h_m > 2$.

Hinsichtlich des Schiffswiderstandes beginnt der Flachwassereinfluss, wenn das Verhältnis von Wassertiefe zum Tiefgang des Schiffes $h/T \leq 4$ wird. Er ist sehr ausgeprägt bei $h/T \leq 2$ /Binek, Müller 1991/

Fußsicherung: Unterer Abschluss einer Böschungssicherung.

Gewässerbett: Benetzte Umrandung eines Gewässers, bestehend aus Sohle und Böschung.

Gleitgeschwindigkeit: Schiffsgeschwindigkeit, bei der ein Schiff (Sportboot) ins Gleiten kommt und beginnt, auf seiner eigenen Bugwelle aufzufahren.

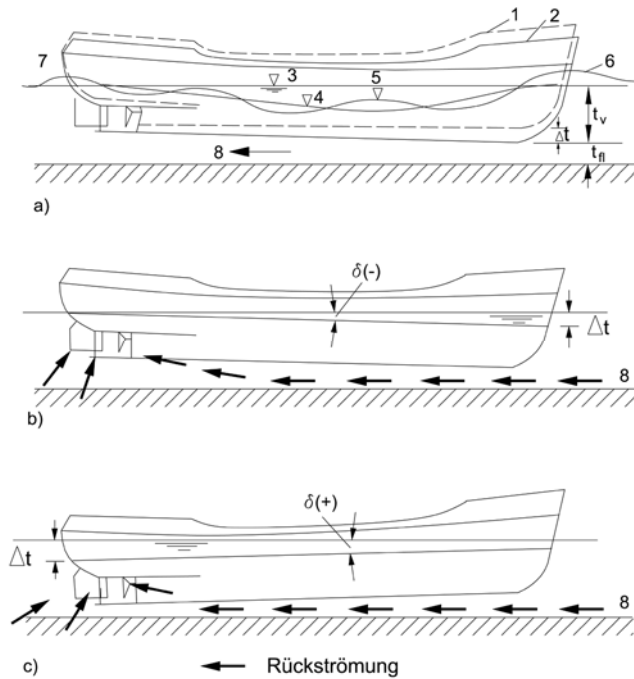


Bild 2.1 Wasserspiegelverformung in Fahrtrichtung, Squat und Richtung der Rückströmung (Vektorpfeil) bei einem herkömmlichen Binnenschiff mit völligem Bug, nach /Kuhn 1985/

(a) Absenkung und Schiffswellen

1 Schiff in Ruhe, 2 Schiff in Fahrt, 3 Ruhewasserspiegel, 4 abgesenkter Wasserspiegel (Primärwelle), 5 überlagerte Sekundärwelle, 6 Bugstau, 7 Heckwelle, 8 Rückströmung, Δt dynamische Einsinktiefe (Squat), t_{fl} Flottwasser, t_v Tauchtiefe,

(b) $\delta(-)$ Trimmwinkel, buglastig

(c) $\delta(+)$ Trimmwinkel, hecklastig

(b) und (c) ohne Wasserspiegelverformung

Hauptpantquerschnitt, eingetauchter: Maximal eingetauchte Querschnittsfläche eines Schiffes (Schiffsbreite mal Abladetiefe) in Ruhe.

Heck(quer)wellen: Wellentyp, der sowohl vom Primär- als auch vom Sekundärwellensystem am Heck des Schiffes erzeugt wird und dessen \Rightarrow Wellenkamm senkrecht zur Fahrtrichtung des Schiffes steht. Heckquerwellen aus Primär- und Sekundärwellensystem können sich überlagern. Eine Sonderform ist der \Rightarrow Rollbrecher.

Kanalfall: Seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser (Tiefen- und Breitenbeschränkung); häufigste Situation auf Binnenwasserstraßen.

Der Einfluss der Breitenbeschränkung (Kanalfall) setzt ein, wenn das Verhältnis von Wasserspiegelbreite zur Schiffslänge $b_{ws}/L \leq 2 - 3$ wird /Schuster 1952/

Kanalbedingungen herrschen bei kleinen Querschnittsverhältnissen. Grob angenähert gilt für MS und GMS $n = A/A_M \leq 25 - 35$: der größere Wert gilt für lange und schmale Schiffe mit geringem Tiefgang, der kleinere Wert für kurze und breite Schiffe mit großem Tiefgang.

Kursweg: Lage der tatsächlichen Fahrwegachse des Schiffes zur Gewässer-/Wasserstraßenachse.

Manövrierfahrt: Schifffahrt zum Manövrieren mit geringer Schiffsgeschwindigkeit $v_s \sim 0$, d. h. mit dem \Rightarrow Propellerfortschrittsgrad $J \sim 0$ und maximaler Propellerschubbelastung (Fälle: Anfahren, Stoppen, Wenden).

Normalfahrt: Schifffahrt mit auf freier Kanalstrecke gemäß BinSchStrO zugelassener oder mit technisch möglicher Schiffsgeschwindigkeit.

n-Verhältnis: \Rightarrow Querschnittsverhältnis

Porenwasserüberdruck: Der Porenwasserüberdruck ist der über den hydrostatischen Porenwasserdruck hinausgehende Wasserdruck in den Poren eines Erdstoffes, der durch behinderte Volumenzunahme des Porenwassers (bei Druckänderungen im Porenwasser) oder behinderte Volumenabnahme des Korngerüsts (bei Änderungen der totalen oder effektiven Spannung des Korngerüsts) entsteht. Er entsteht durch \Rightarrow schnellen Wasserspiegelabsenk. Im Untergrund herrscht dann noch ein höherer Druck als an der Grenzfläche Wasser - Boden.

Primärwelle (Primärwellensystem): Folge der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße; sie resultiert aus der Verdrängungsströmung um den Schiffskörper, zu der die Wasserspiegelabsenkungen beiderseits des Schiffes und die Stauwellen an Bug und Heck gehören. Sie ist eine mit dem Schiff fortschreitende, nach den Seiten hin abklingende Welle (s. Bild 2.2 und Bild 2.3).

Propellerfortschrittsgrad: Verhältnis $J = v_A/nD$ aus Anströmgeschwindigkeit des Propellers v_A zum Produkt von Drehzahl n und Propellerdurchmesser D .

Querschnittsverhältnis: Verhältnis $n = A/A_M$ der (rückströmungswirksamen) Querschnittsfläche A einer Wasserstraße bei einem bestimmten Wasserstand zur Querschnittsfläche A_M des eingetauchten Teils eines Schiffes; in angloamerikanischer Fachliteratur wird meist der Kehrwert des Querschnittsverhältnisses $k = 1/n$, der blockage coefficient, verwendet.

Querwellen: Anteil des \Rightarrow Sekundärwellensystems, bei dem die Wellenkämme senkrecht zur Fahrtrichtung des Schiffes orientiert sind.

Reflexion: Trifft eine Welle auf eine Grenzfläche (Wand, Buhne, Leitwerk, Steilufer u. ä.), so wird sie dort teilweise zurückgeworfen. Dies bewirkt Verluste an Wellenenergie. Meist ist die Höhe der reflektierten Welle geringer als die der einfallenden Welle. Einfallende und reflektierte Wellen überlagern sich.

Refraktion: Richtungs- und Betragsänderung einer Wellenfront durch Sohlreibung infolge Wassertiefenänderung im Uferbereich. Betrifft ursprünglich uferparallel laufende Wellen, die so zum Ufer hin gebeugt werden, und bereits schräg laufende, schiffserzeugte Sekundärwellen. Eine Seite des \Rightarrow Wellenkamms befindet sich in geringerer Wassertiefe als die andere. Da bei Flachwasserwellen die Wellengeschwindigkeit mit der Wassertiefe abnimmt, läuft der ufernähere Wellenflügel langsamer als der uferferne. Der Wellenkamm erfährt insgesamt eine Krümmung. Die \Rightarrow Wellenhöhe nimmt durch die Refraktion ab. Refraktion tritt zusammen mit \Rightarrow Wellenaufsteilen auf.

Rollbrecher: Wenn die längs des Ufers laufenden \Rightarrow Heckquerwellen brechen, werden sie Rollbrecher genannt; sie sind besonders hoch im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit.

Rückströmung: Strömung entgegen der Fahrtrichtung des Schiffes, verursacht durch die Verdrängungswirkung des Schiffes und den Absunk.

Schiffsgeschwindigkeit, kritische: Geschwindigkeit v_{krit} des Schiffes im Flachwasser bzw. bei der Kanalfahrt, bei der das vom Schiff verdrängte Wasser nicht mehr vollständig im strömenden Zustand entgegen der Fahrtrichtung nach hinten abgeführt werden kann. Es beginnt der Wechsel vom strömenden zum schießenden Fließzustand (Froude-Zahl im engsten Querschnitt neben dem Schiff gleich 1). v_{krit} kann von Verdrängern i. d. R. nicht überschritten werden. Der Versuch, schneller als mit v_{krit} zu fahren, z. B. durch Steigerung der Antriebsleistung, führt bei Verdrängern i. Allg. zu noch größeren Rückströmungsgeschwindigkeiten und Absunkwerten als bei v_{krit} , wobei die Schiffsgeschwindigkeit über Grund wieder kleiner wird oder/und das Schiff an die Sohle angesaugt wird.

Schiffswellen: Das fahrende Schiff erzeugt auf Grund schiffshydrodynamischer Effekte Wellen auf der Gewässeroberfläche.

Schrägwellen: Anteil des \Rightarrow Sekundärwellensystems, bei dem sich die Wellenkämme in einem spitzen Winkel zur Fahrtrichtung des Schiffes ausbreiten.

Schwall- und Sunkwellen: Durch betriebsbedingte plötzliche Abflussveränderungen entstehende Wasserspiegelschwankungen. Sie haben den Charakter von Einzelwellen im Flachwasser.

Sekundärwellen (Sekundärwellensystem): An Bug und Heck des Schiffes entstehen gleichzeitig aufgrund der Konturänderungen am Schiffsrumpf regelmäßige, kurzperiodische Wellen, die als Sekundärwellen bezeichnet

werden. Diese Wellen sind zum einen Schrägwellen, die sich mit einem Winkel zur Schiffsachse ausbreiten, zum anderen Querwellen, annähernd senkrecht zur Schiffsachse orientiert. Die Überlagerung beider Systeme erzeugt eine Interferenzlinie, die abhängig von der Fahrgeschwindigkeit einen charakteristischen Winkel zur Schiffsachse aufweist: Bei üblichen Schiffsgeschwindigkeiten beträgt dieser Winkel $19,47^\circ$. (s. Bild 2.2 und Bild 2.3).

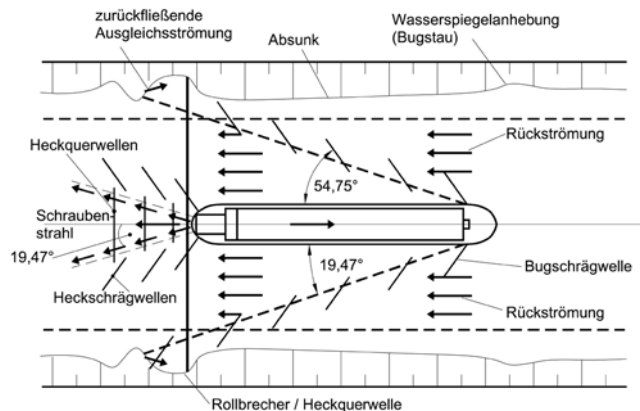


Bild 2.2 *Wasserspiegelverformung in der Draufsicht: ungünstigste Überlagerung von Primär- und Sekundärwellensystem*

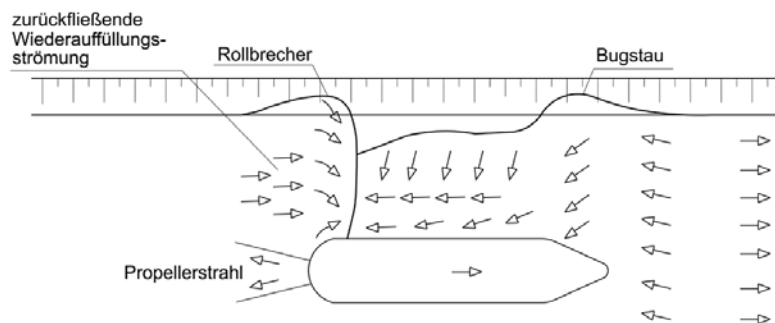


Bild 2.3 *Wasserspiegelverformung in der Draufsicht: Primärwellensystem und Rollbrecher im kritischen Geschwindigkeitsbereich bei einem kurzen, ufernah fahrenden Schiff*

Squat: \Rightarrow fahrdynamisches Einsinken

Standprobe: Der Propeller arbeitet mit dem Propellerfortschrittsgrad $J = 0$.

Standssicherheit, globale: Die Sicherheit der wasserseitigen Böschung gegen Bruchzustände im Boden, bei denen die gekrümmte Gleitfläche des Bruchkörpers verhältnismäßig tief, d. h. unterhalb der \Rightarrow kritischen Tiefe (Bruchfuge) für die lokale Standssicherheit, in den Boden einschneidet.

Standssicherheit, lokale: Die Sicherheit gegen Bruchzustände im Boden der wasserseitigen Böschung, bei denen die Gleitfläche des Bruchkörpers verhältnismäßig oberflächennah, d. h. in der \Rightarrow kritischen Tiefe verläuft.

Sturzbrecher: Bei flacher werdendem Wasser nimmt die Geschwindigkeit der ankommenden Welle in Bodennähe ab, gleichzeitig nimmt die Steilheit der Wellenfront zu, ohne dass in dieser Phase eine bedeutende Luftaufnahme eintritt. Etwa bei senkrechter Lage der Wellenfront kommt es unter intensiver Luftaufnahme und -durchmischung zum Überstürzen der Wellenfront. Trifft die sich überstürzende Welle auf die Uferböschung, kommt es infolge der Kompressibilität der eingeschlossenen Luft zu einem Druckschlag auf die Uferböschung, wobei der Welle viel Energie entzogen wird. Dieser Brechertyp ist auf steileren Uferböschungen zu beobachten.

Tiefe, kritische: Die Tiefe einer böschungsparellen oberflächennahen Bruchfläche im anstehenden Boden, in der der Scherwiderstand, der durch \Rightarrow Porenwasserüberdruck infolge eines \Rightarrow schnellen Wasserspiegelabsinks reduziert wird, zu einem Minimum wird (\Rightarrow lokale Standsicherheit).

Tiefgangsverhältnis: Verhältnis Wassertiefe zu Tiefgang eines Schiffes h/T .

Tiefwasser: Die Wellenausbreitung kann ohne Tiefen- oder Breitenbeschränkung völlig ungehindert stattfinden bzw. abklingen; Situation in großen, tiefen Seen oder Meeren.

Vertrimmung (= dynamische V.): Zusätzliche Neigung der Schiffslängsachse gegen die Horizontale infolge fahrdynamischer Vorgänge (\Rightarrow Fahrdynamisches Einsinken).

Vortrimmung (= statische Vertrimmung): Um bei der Fahrt in Gewässern mit beweglicher Sohle, z. B. in Flüssen, aus Sicherheitsgründen zu gewährleisten, dass das Schiff an Untiefen zuerst am Bug Sohlberührung bekommt und nicht am Heck, kann die Abladetiefe am Bug größer gewählt werden als am Heck.

Wasserspiegelabsunk: Durch Verdrängungsströmung bedingte Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff.

Die Fahrt des Schiffes bedingt ein spezielles Umströmungsbild, das mit Verformungen des Wasserspiegels einhergeht. Begriffe dazu sind auf Bild 2.1 (Längsschnitt) sowie Bild 2.2 und Bild 2.3 (Draufsichten) zu sehen.

Wasserspiegelabsunk, schneller: Wasserspiegelabsunk, bei dem die Absunkgeschwindigkeit größer als die Durchlässigkeit des Gewässerbetts ist.

Wassertiefe, mittlere: Rechnerische Tiefe eines Gewässers, die sich aus dem Quotienten Fließquerschnitt/Wasserspiegelbreite ergibt.

Wichtige gewässerhydraulische Begriffe sowie Abmessungen von Fahrwasser und -rinne, wie sie in der vorliegenden Schrift verwendet werden, sind in Bild 2.4 zusammengestellt.

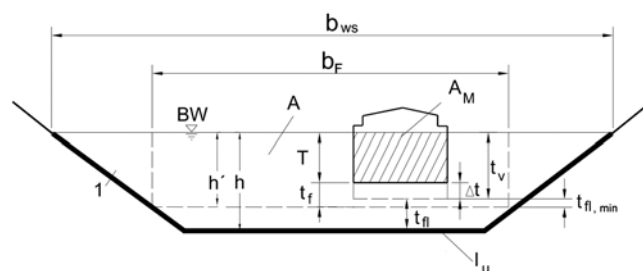


Bild 2.4 Abmessungen von Kanal und Fahrrinne, nach /Kuhn 1985/

1 Kanalprofil bzw. bemessungsrelevantes Gewässerbett, b_F Fahrinnenbreite, b_{WS} Wasserspiegelbreite, h' Fahrinnentiefe, h Wassertiefe, T Tiefgang, Δt Einsinktiefe (Squat), t_v Tauchtiefe = $T + \Delta t$, t_f Kieflfreiheit = $h' - T$, t_{fl} Flottwasser, $t_{fl,min}$ Mindestflottwasser, A Kanalquerschnitt, A_M eingetauchter Schiffsquerschnitt am Hauptspant, l_u benetzter Umfang (ohne Schiff), BW Betriebswasserstand

Wellenaufwurf: Tritt auf, wenn eine gebrochene oder ungebrochene Welle noch eine gewisse Strecke die Uferböschung aufwärts läuft.

Wellenaufsteilen: Im \Rightarrow Flachwasser hat die Welle ständig Grundberührung. Abnehmende Wassertiefe ruft - bei konstanter Periode - eine Reduzierung von Fortschrittsgeschwindigkeit und Wellenlänge sowie eine Zunahme der Wellenhöhe hervor. Wellenfront und -rücken werden steiler. Bei schräg auflaufenden Wellen tritt auch \Rightarrow Refraktion auf.

Wellenbrechen: Erreicht die \Rightarrow Wellensteilheit infolge \Rightarrow Wellenaufsteilen einen kritischen Grenzwert, so bricht die Welle. Der Vorgang ist mit der Bildung eines Wasser-Luft-Gemisches und mit dem Verlust von Wellenenergie verbunden (\Rightarrow Sturzbrecher).

Wellenhöhe: Bei regelmäßigen Wellen oder festgelegten Bemessungswellen ist als Wellenhöhe z. B. der vertikale Abstand zwischen direkt aufeinanderfolgendem Hoch- und Tiefpunkt einer Welle definiert. Zeitlich liegen diese Punkte eine halbe Wellenlänge/-periode auseinander. Bei natürlichen, unregelmäßigen Wellen können für die Ermittlung der Bemessungswellenhöhe statistische Verfahren angewendet werden.

Wellenkamm: Scheitellinie eines Wellenberges senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

Wellenlänge: Bei regelmäßigen Wellen oder festgelegten Bemessungswellen ist als Wellenlänge z. B. der horizontale Abstand zweier Wellenberge bzw. -täler definiert. Bei natürlichen, unregelmäßigen Wellen können statistische Verfahren angewandt werden.

Wellensteilheit: Verhältnis von \Rightarrow Wellenhöhe zu \Rightarrow Wellenlänge. Sie ist ein veränderlicher geometrischer Kennwert für Wellen.

Wellenüberlagerung: Treffen Wellen verschiedener Entstehungsart, Richtung oder Geschwindigkeit aufeinander, so überlagern sich ihre Höhen additiv, wenn die Wellenhöhen im Verhältnis zur Wassertiefe klein sind.

Wellenverformung: Können sich Wellen nicht ungehindert ausbreiten (z. B. infolge Wassertiefenänderung bei \Rightarrow Flachwasser, Gewässerberandung, Bauwerk, Anlaufwinkel u. ä.), so verändern sich die Wellenkämme und

besonders die Wellenhöhen. Wesentliche Verformungsarten sind \Rightarrow Wellenaufsteilen, \Rightarrow Wellenbrechen, \Rightarrow Diffraktion, \Rightarrow Refraktion und \Rightarrow Reflexion.

Wiederauffüllungsströmung: Die Absunkmulde wird an einem geböschten Ufer beim Auftreten eines \Rightarrow Rollbrechers von achtern her wieder aufgefüllt.

Windstau: Wasserspiegelanhebung am windabgewandten Ende eines \Rightarrow Windwirkgebietes infolge der Schubspannung zwischen Luftströmung und Wasseroberfläche bei längerer konstanter Windeinwirkung.

Windwellen: Durch Windeinwirkung auf der Gewässeroberfläche entstehende Wellen.

Windwirkgebiet: Bereich auf einer Gewässeroberfläche, der der Erzeugung von \Rightarrow Windwellen zur Verfügung steht. Die Längen- und Breitenbegrenzung durch Topographie (z. B. Ufer, Insel) und/oder meteorologische Bedingungen (z. B. Windrichtung) führen auf ein **effektives Windwirkgebiet**.

3 Übersicht der hydraulischen Belastungen des Gewässerbetts

3.1 Allgemeines

Sohle und Ufer unterliegen folgenden hydraulischen Einwirkungen, die sowohl einzeln als auch gleichzeitig auftreten können:

- Strömung
- Wellen
- Wasserspiegelabsenk
- Grundwasserzustrom

Während Strömungen und Wellen eine Erosion des Gewässerbetts bewirken können, sind bei schnellem Wasserspiegelabsenk oder bei starkem Grundwasserzustrom Rutschungen bzw. Auflockerungen des Bodens (Hebungen) möglich.

Die Standsicherheit des Gewässerbetts ist gegenüber diesen hydraulischen Einwirkungen nachzuweisen, wenn Veränderungen eines Querschnitts nicht hingenommen werden können. Ist sie nicht ausreichend, so sind Sicherungsmaßnahmen an den Ufern und/oder an der Sohle vorzusehen.

3.2 Strömungen

Für Wasserstraßen sind nur die **turbulenten** Strömungen von Bedeutung. Diese können je nach Korngröße des im Gewässerbett vorhandenen Materials zur Erosion führen. Stark turbulente Strömungen treten besonders auf

- im Unterwasser von Wehranlagen,
- im Schraubenstrahl von Schiffen,
- bei Rückströmung infolge Schifffahrt und
- in der Wiederauffüllungsströmung.

3.3 Wellen

3.3.1 Allgemeines

Wellen werden an Wasserstraßen durch Schifffahrt und durch starken Wind erzeugt. Sie können aber auch durch Wehr-, Schleusen- oder Kraftwerksbetrieb (Schwall/Sunk) hervorgerufen werden. Bei schiffserzeugten Wellen unterscheidet man zwischen dem Primärwellensystem, zu dem der Wasserspiegelabsenk gehört, der in Schiffsnähe auftritt und dessen Fortschrittsgeschwindigkeit der Schiffsgeschwindigkeit entspricht, und den Sekundärwellen, die sich weit vom Schiff fortbewegen können und sich dort wie freie Wellen verhalten. Form und Wirkung der Wellen am Ufer werden in 3.3.2, die Wirkung des Wasserspiegelabsenks in 3.4 erläutert.

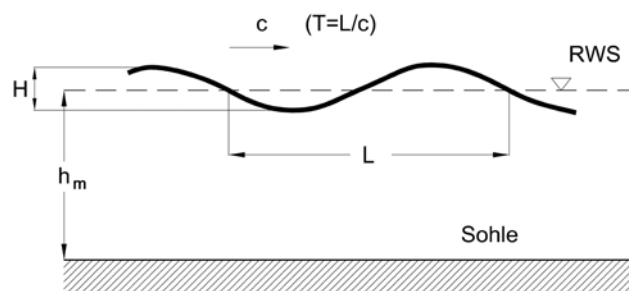


Bild 3.1 Charakteristische Größen einer sinusförmigen Wellenbewegung mit kleiner Wellenhöhe

Das Verhalten von freien Wellen und ihre Wirkungen auf das Gewässerbett sind unabhängig von der Entstehungsart der Wellen. Sie werden durch folgende charakteristische Größen gekennzeichnet (s. auch Bild 3.1):

- Wellenhöhe H
- Wellenlänge L
- Wellenfortschrittsgeschwindigkeit c

- Wellenperiode T
- mittlere Wassertiefe h_m

Da das Verhalten einer Welle von einer bestimmten Wassertiefe an durch verschiedene Einflüsse (s. 5.7) verändert wird, ist es gebräuchlich, entsprechend dem Verhältnis mittlere Wassertiefe zu Wellenlänge h_m/L in Tief- und Flachwasserbereich zu unterteilen (s. Bild 3.2).

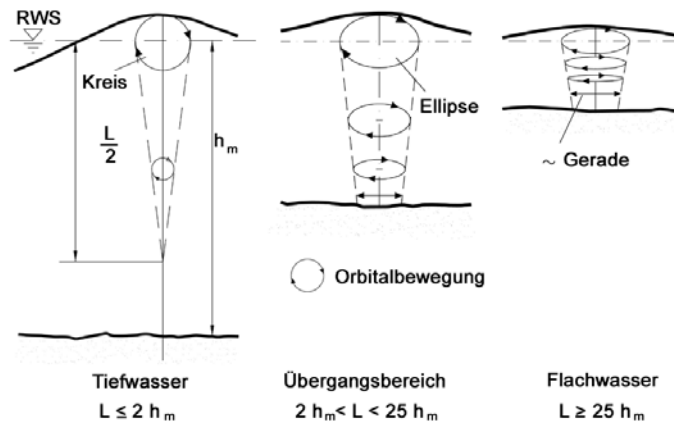


Bild 3.2 Wellenbereiche in Abhängigkeit von der mittleren Wassertiefe ($h_m = A/b_{WS}$) und Wellenlänge L

Im **Tiefwasser** hängt die Wellengeschwindigkeit c einer freien Welle, d. h. einer Welle, die nicht wie Primär- und Sekundärwellensystem an das Schiff gebunden ist, nur von der Wellenlänge ab:

$$c = \sqrt{\frac{Lg}{2\pi}} \quad (3-1)$$

mit

L Wellenlänge [m]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

Im **Flachwasser** wird die Wellengeschwindigkeit einer freien Welle, auch als Stauwellengeschwindigkeit c_0 bezeichnet, nur noch von der mittleren Wassertiefe bestimmt:

$$c = c_0 = \sqrt{gh_m} = \sqrt{\frac{gA}{b_{WS}}} \quad (3-2)$$

mit

A Fließquerschnitt [m²]

b_{WS} Wasserspiegelbreite [m]

h_m mittlere Wassertiefe [m]

Im **Übergangsbereich** ist die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit freier Wellen von der Wassertiefe und der Wellenlänge abhängig:

$$c = \left(\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h_m}{L} \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

Bei schiffserzeugten Sekundärwellen (s. 5.5.5) ist die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit an die Schiffsgeschwindigkeit geknüpft.

Für praktische Berechnungen genügt nach /Press, Schröder 1966/i. d. R. folgende Unterscheidung:

Tiefwasser: $h_m / L \geq 0,5$

Flachwasser: $h_m / L < 0,5$

Danach sind schiffserzeugte Sekundärwellen i. d. R. als Tiefwasserwellen, die Primärwelle infolge Absink als Flachwasserwelle zu betrachten.

3.3.2 Form und Wirkung der Welle am Ufer

- **Mitlaufende ungebrochene Welle**

Beim Durchgang einer ungebrochenen Welle in Uferlängsrichtung treten an der Böschung schnelle hydrostatische Druckwechsel auf, denen der Porenwasserdruck im Untergrund nicht gleich schnell folgen kann (s. 3.4). Je nach momentaner Lage der Wasseroberfläche ist der Porenwasserdruck im Boden größer als der äußere hydrostatische Druck ("Wellental") bzw. kleiner ("Wellenberg"), wodurch eine Strömung aus dem Untergrund heraus bzw. hinein ausgelöst wird. Die aus dem Untergrund heraus gerichtete Porenwasserströmung setzt die bereits durch den Auftrieb verminderte Gewichtskraft der Einzelkörner des Bodens herab und führt ggf. zu einer Auflockerung. Bei gleichzeitigen Strömungseinwirkungen kann sie eine Erosion begünstigen.

Im **Übergangs-** und **Flachwasserbereich** kann die Orbitalbewegung einer Welle zur pendelnden Hin- und Herbewegung von Einzelkörnern und zu geringfügigen Umlagerungen auch von kleinen Deckwerkssteinen führen. Erst wenn die Strömungskräfte so groß werden, dass sie das in Bewegung versetzte Material weiter verfrachten, tritt eine signifikante Erosion ein.

- **Auflaufende brechende Welle**

Freie Wellen und Sekundärwellen des Schiffes können in Uferquerrichtung auflaufen und dabei brechen. Die Brecherart in GBB 2004 /BAW 2004/ hängt i. W. von der Böschungsneigung ab. Die Stabilität des Ufers (Wasserwechselbereich) wird besonders durch Sturzbrecher beeinflusst, da das stürzende Wasser sowie dadurch ausgelöste Auf- und Ablaufströmungen durch Strömungskraft und hohe Turbulenz sehr erosiv (Steinverlagerung) wirkt. Der dabei auftretende Druckschlag bewirkt im gesättigten Untergrund auch einen Porenwasserüberdruck, dessen Größe das Mehrfache der Wellendruckhöhe betragen kann. Seine Wirkung ist relativ gering, wenn die Welle in ein Wasserpolster oder in eine sehr hohlraumreiche Deckschicht (z. B. Steinschüttung) bricht. Nur mehrere, dicht aufeinander folgende Druckschläge können die Standsicherheit der Uferböschung reduzieren, weil die Porenwasserüberdrücke im Boden nicht schnell genug abklingen können und so die Scherfestigkeit herabgesetzt wird.

- **Mitlaufende brechende Welle**

Eine im Heckbereich von Schiffen uferparallel mitlaufende Welle (Heckquerwelle) kann – abhängig von Wellensteilheit und Froude-Zahl bzw. vom Verhältnis Schiffsgeschwindigkeit zu kritischer Geschwindigkeit – brechen (Rollbrecher bzw. Wiederauffüllungsströmung). Die lokal große Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung kann zu Umlagerungen von Steinen führen.

3.4 Wirkung des Wasserspiegelabsinks

3.4.1 Allgemeines

Der Wasserspiegel eines Gewässers kann sich durch natürliche oder künstliche Einflüsse langsam oder schnell ändern. Von Bedeutung ist dabei für die geotechnische Standsicherheit des Gewässerbetts (Uferböschungen, Sohle), ob das Porenwasser des anstehenden Bodens den Wasserspiegeländerungen des Gewässers ohne Entstehung nennenswerter Überdrücke folgen kann oder nicht.

Für das Entstehen eines Porenwasserüberdruckes kann als erster Anhalt und auf der sicheren Seite liegend der Vergleich der Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels (v_{za}) mit der Wasserdurchlässigkeit des Bodens (k - Wert) herangezogen werden.

(a) langsam fallender Wasserspiegel: $v_{za} < k$

(b) schnell fallender Wasserspiegel: $v_{za} \geq k$

3.4.2 Langsam fallender Wasserspiegel

Der hydrostatische Porenwasserdruck im Boden des Gewässerbetts nimmt bei Absink des Wasserspiegels immer mit einer zeitlichen Verzögerung ab, weil Porenwasser nur ausfließen kann, wenn eine Druckdifferenz vorhanden ist.

Ist die Absinkgeschwindigkeit kleiner als die Durchlässigkeit des Bodens ($v_{za} < k$), dann ist der mögliche Gradient auch klein, und der Porenwasserdruck liegt nur geringfügig über dem des gerade wirksamen freien Wasserspiegels. Die damit verbundene Strömungskraft kann hinsichtlich der Standsicherheit der Uferböschungen und der Sohle vernachlässigt werden.

3.4.3 Schnell fallender Wasserspiegel

Fällt der Wasserspiegel eines Gewässers schneller, als sich der im Boden vorhandene hydrostatische Porenwasserdruck anpassen kann ($v_{za} \geq k$), so führt dies zu Porenwasserüberdrücken im Boden. Ursache des Porenwasserüberdrucks ist die Verzögerung des Druckausgleichs durch Gasbläschen, die sich mit der Abnahme des Drucks vergrößern /Köhler 1993/; /Köhler 1997/.

Durch den Porenwasserüberdruck werden Sickerströmungen in Richtung der Bodenoberfläche (s. Bild 3.3) ausgelöst. Hierbei können die effektiven Spannungen im Boden und damit die Reibungskräfte soweit reduziert werden, dass statische Grenzzustände auftreten. Dann kann eine Uferböschung (mit oder ohne Deckwerk) in einer böschungsparellen Bruchfläche in der Tiefe d_{krit} abgleiten (s. 7.2.3) oder es finden oberflächennahe Auflockerungen ("hydrodynamische Bodenverlagerung") in der Böschung oder der Sohle statt (s. **Anhang A**).

Diese Grenzzustände im Boden können durch ein ausreichend schweres Deckwerk verhindert werden, das i. W. über die Rohdichte der Wasserbausteine und die Deckwerksdicke dimensioniert wird.

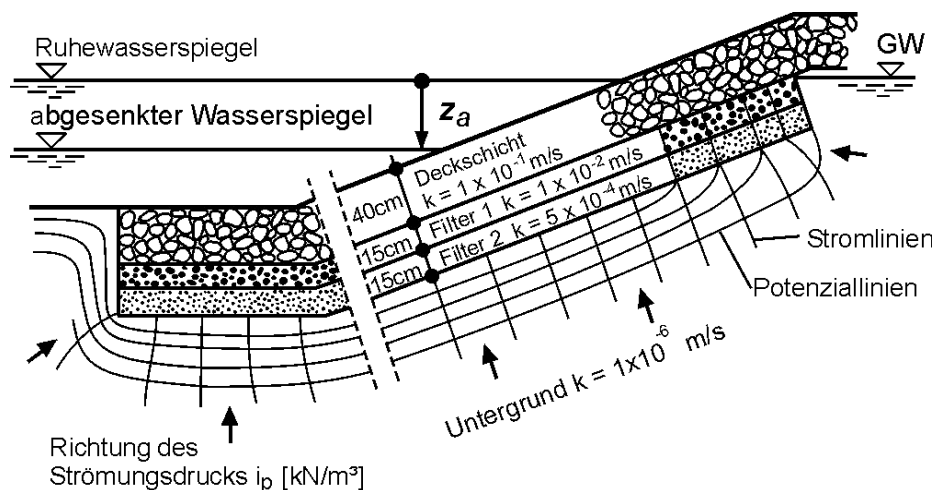
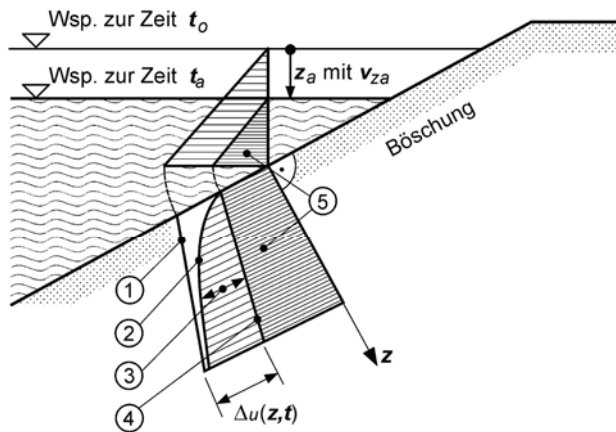


Bild 3.3 Strom- und Potenziallinien im Boden unter einer durchlässigen Böschungssicherung bei schnellem Wasserspiegelabsink

Die Größe und der Verlauf des Porenwasserüberdrucks infolge eines schnellen Wasserspiegelabsinks werden i. W. vom Absink z_a , von der Absinkzeit t_a , von der Durchlässigkeit des Bodens k und von der Kompressibilität des Wasser-Boden-Gemisches (inkl. Gasanteil) in der oberflächennahen Zone des Gewässerbetts bestimmt. Die Einflussgrößen t_a , k und Kompressibilität werden zusammen durch den Porenwasserdruckparameter b berücksichtigt (s. 7.1.3).

Der Porenwasserüberdruck Δu ist an der Böschungsoberfläche gleich Null und nimmt mit der Tiefe z zu (s. Bild 3.4). Zum Zeitpunkt t_a des Erreichens des Absinkmaximums z_a besitzt er seinen Höchstwert und klingt dann mit der Zeit wieder ab.



Legende :

- ① Porenwasserdruck zur Zeit t_0
- ② Porenwasserdruck zur Zeit t_a
- ③ Porenwasserüberdruck Δu zur Zeit $t = t_a$
- ④ Porenwasserdruck zur Zeit $t = t_\infty$
- ⑤ Hydrostatischer Druckanteil für $t = t_a$
- z_a Wasserspiegelabsenk
- v_{za} Absinkgeschwindigkeit ($v_{za} = \frac{z_a}{t_a}$)
- Δu Porenwasserüberdruck
- z Tiefe im Boden senkrecht zur Böschung

Bild 3.4 Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsinks

3.5 Grundwasserzustrom

Liegt der Grundwasserspiegel in der Böschung über dem Ruhewasserspiegel des Gewässers, z. B. bei einem Gewässer im Einschnitt oder nach dem Ablauf eines Hochwassers, so erfolgt ein Grundwasserzustrom zum Gewässer. Dadurch wirkt im Böschungsuntergrund ein höherer hydrostatischer Wasserdruck und damit eine Strömungskraft in Richtung auf das Gewässer. Diese Einwirkungen sind bei allen geotechnischen Berechnungen zu berücksichtigen.

Bei Austritt des Grundwassers aus einer ungeschützten Böschung wird erfahrungsgemäß der Grenzzustand der lokalen Böschungsstabilität erreicht bei einer Böschungsneigung von

$$\beta \leq \varphi'/2 \quad (3-4)$$

mit

β Böschungswinkel [°]

φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Ein länger dauernder Austritt von Grundwasser an der Oberfläche einer ungeschützten Böschung sollte daher in jedem Fall vermieden werden. Bei seltenem und nur kurzzeitigem Grundwasseraustritt ist bei Neigungen $\beta < \varphi'/2$ durch eine lückenlose Grasschicht ein ausreichender Schutz gegeben.

4 Sicherheits- und Bemessungskonzept

4.1 Allgemeines

Für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen erfolgt keine Lastfallunterscheidung nach /DIN 1054/.

Die geotechnischen Nachweise werden mit auf der sicheren Seite liegenden Lastansätzen geführt und berücksichtigen lokale Versagensmechanismen mit relativ geringem Schadenspotenzial. Daher gelten sie - soweit nicht explizit anders vermerkt - als erbracht, wenn unter der aufgeführten Einwirkungskombination der Grenzgleichgewichtszustand nachgewiesen werden kann. Lediglich beim Nachweis der globalen Standsicherheit (s. 7.4) wird ein höheres Sicherheitsniveau durch den Ansatz von Teilsicherheitsbeiwerten nach /DIN 1054/ gefordert.

Für die hydraulischen Nachweise, mit denen eine Bemessung der erforderlichen Steingröße zur Gewährleistung ihrer Lagesicherheit bei Strömungs- und Wellenbeanspruchung durchgeführt wird, sind die Anforderungen an die Auftretenswahrscheinlichkeit der anzusetzenden Einwirkungen nicht so streng wie für die geotechnischen Nachweise, weil die Verlagerung von einzelnen Steinen - auch wenn sie mit der Zeit akkumulieren - weder die Standsicherheit des Deckwerks noch eines Kanalseitendamms gefährdet. Daher sollte der hydraulischen Bemessung eigentlich eine Kosten-Nutzen-Analyse zu Grunde gelegt werden, in der die Mehrkosten eines schwereren oder teilvergossenen Deckwerks dem Unterhaltungsaufwand gegenübergestellt werden, der für die Reparatur- und Nacharbeiten im Laufe der Standzeit an einem leichteren Deckwerk entsteht, und nicht der hier verfolgte Weg nach Belastungsgrenzwerten. Wesentliche Parameter für den Unterhaltungsaufwand wären dabei neben der Deckwerkskonstruktion vor allem das Verkehrsaufkommen und die Flottenstruktur: Je häufiger Schiffe verkehren, die eine große Belastung der Deckwerke erzeugen, umso mehr Steine werden aus dem Verband gerissen und bewegen sich zum Fuß der Böschung.

Eine solche Kosten-Nutzen-Analyse setzt aber eine umfassende und detaillierte Datenbasis über die Unterhaltungsaufwendungen für die unterschiedlichen Deckwerkskonstruktionen in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens und der Flottenstruktur voraus. Diese Datenbasis liegt bislang noch nicht vor.

Um trotzdem zu einem ersten Bemessungsansatz zu kommen, wurden neben veröffentlichten Berechnungsansätzen und Messergebnissen zusätzlich die Analyse neuer Fahrversuche mit unterschiedlichen Schiffstypen /BAW 2009/ herangezogen, bei denen durch die Wellen- und Strömungsbelastungen deutliche Steinverlagerungen an neuen Deckwerken erzeugt und in ihrem Umfang quantifiziert werden konnten. In Zukunft sollten weitere systematische Dokumentationen von Unterhaltungsaufwendungen für Deckwerke durchgeführt werden, um so in Verbindung mit Messergebnissen zu den Einwirkungen eine breitere und zuverlässigere Erfahrungsbasis für das Bemessungskonzept von Deckwerken zu gewinnen.

Das hier vorgestellte Bemessungskonzept umfasst folgende hydraulische Nachweise:

- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Heckquerwellenbelastung ('Normalfahrt') nach 6.2
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Belastung durch Propulsionsströmung ('Manövrierfahrt') nach 6.3
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Belastung durch Sekundärschrägwellen nach 6.4
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Windwellen bzw. kombinierter Schiffs- und Windwellenbelastung nach 6.5
- Ermittlung der erforderlichen Steingröße bei Strömungsangriff nach 6.6
- Einhaltung der Mindestdicken der Deckschicht nach 6.9
- Bestimmung der Mindestlänge des Deckwerks in Böschungsfalldirne (Teildeckwerk) nach 6.10

Für die zur Durchführung der hydrodynamischen Nachweise erforderlichen Bemessungsgrößen, z. B. die Höhe der Heckquerwelle oder die schraubenstrahlinduzierte sohlennahe Strömungsgeschwindigkeit, können entweder Messdaten oder die in Kap. 5 angegebenen Formeln verwendet werden, wenn keine geeigneten Messdaten vorliegen, z. B. im Prognosefall.

Die erforderlichen geotechnischen Nachweise sind die folgenden:

- Lokale Standsicherheit einer durchlässigen Deckschicht zur Ermittlung des Flächengewichts gegen Abgleiten nach 7.2.5, gegen hydrodynamische Bodenverlagerung nach 7.2.6 und unter Berücksichtigung einer Fußstützung nach 7.2.7

- Lokale Standsicherheit eines dichten Deckwerks zur Ermittlung des Flächengewichts gegen Abheben (s. 7.3.2) und Abgleiten (s. 7.3.3)
- Globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung einschließlich Deckwerk nach 7.4

Maßgebend ist die größte der sich aus den verschiedenen Nachweisen ergebende erforderliche Steingröße und Deckschichtdicke bzw. das größte Flächengewicht der Deckschicht.

4.2 Hydraulische Nachweise

Der Schwerpunkt der nachfolgend diskutierten Bemessungsverfahren betrifft Deckwerke aus unverklammerten Steinschüttungen. Aspekte zur Verwendung eines Teilvergusses sind in Kap. 8 genannt.

4.2.1 Aspekte zur Festlegung der Bemessungsgrößen

Die Bemessung der Böschungssicherungen erfolgt durch geeignet gewählte Grenzwerte der Bemessungsgrößen. Letztere werden vor allem durch das gewählte Bemessungsschiff, die Schiffsgeschwindigkeit, die Position des Schiffes im Querprofil und die Fahrsituation (Einzelfahrt, Begegnung, Überholen) bestimmt. Diese Kenngrößen sollten unter Beachtung ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit und möglicher Schäden gewählt werden. Hierbei sind folgende Aspekte zu beachten:

- **Versagensrisiko:** Die Standsicherheit einer Uferböschung kann durch den Absink bei einer einzelnen Schiffspassage mit hoher Schiffsgeschwindigkeit gefährdet werden. Daher ist die größte realistische Schiffsgeschwindigkeit (kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} oder maximal zulässige Geschwindigkeit v_{zul}) für den Nachweis der globalen Standsicherheit einer Uferböschung anzusetzen. Wenn Einzelschäden wie z. B. Steinverlagerungen auftreten, die nicht zum Bauwerksversagen führen, sondern nur deren Summe (Dauerschädigung), kann ein typischer Größtwert der gewählten Schiffsgeschwindigkeit angesetzt werden. Im Regelfall wird in Analogie zum /MAR 2008/ empfohlen, von 97 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit auszugehen.
- **Flotte und Relationen:** Fahren überwiegend moderne, stark motorisierte Schiffe, die auf Grund ihrer Motorleistung v_{krit} erreichen können, oder/und gibt es Argumente dafür, dass die Fahrzeuge im betrachteten Kanalabschnitt besonders schnell fahren, sind höhere Bemessungsgeschwindigkeiten anzusetzen als bei überwiegend älteren, schwächer motorisierten Schiffen und Verbänden. Bei der Flottenzusammensetzung ist auch der Anteil an Sportbooten, an Schleppern und einzeln fahrenden Schubbooten sowie deren Motorisierung und Größe zu beachten. Die kritische Schiffsgeschwindigkeit ist bei diesen Schiffstypen nicht immer begrenzend für die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und damit die Wellenhöhen, sondern die Gleitgeschwindigkeit. Dabei ist zu prüfen, ob das Schiff diese Geschwindigkeit auf Grund der verfügbaren Motorleistung erreichen kann.
- **Verkehrsstärke:** Je größer das Verkehrsaufkommen ist, desto schneller akkumulieren sich Dauerschäden und desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bemessungsrelevante große Schiffsgeschwindigkeiten, insbesondere bei Fahrt in Ufernähe, gewollt oder ungewollt, z. B. während eines Ausweichmanövers, erreicht werden. Deshalb können bei schwachem Verkehr geringere Bemessungsschiffsgeschwindigkeiten als bei starkem Verkehr angesetzt werden.
- **Größe der Kanalquerschnitte:** In engen Kanalquerschnitten, z. B. in solchen, die für Richtungsverkehr dimensioniert sind, haben die Schiffsführer nur einen kleinen Bereich zur Verfügung, in dem sie die Schiffsgeschwindigkeit mit Ausnahme der Manövrierfahrt variieren können (zwischen nautischer Mindestgeschwindigkeit und v_{krit}), um leicht und sicher zu fahren. Da in diesen Querschnitten auch schwächer motorisierte Fahrzeuge die kritische Schiffsgeschwindigkeit erreichen können, ist das Erreichen von v_{krit} wahrscheinlicher als in breiten Kanälen. Ggf. sind in engen Querschnitten auch überkritische Fahrzustände zu beachten, wenn Schiffe, die in der Kanalmitte mit v_{krit} fahren, zum Ufer hin ausweichen, denn die bei stationärer, ufernaher Fahrt erreichbare kritische Schiffsgeschwindigkeit ist kleiner als die bei zentrischer Fahrt. Bei breiten Kanälen ist dieser Belastungsfall weniger wahrscheinlich, da das Schiff bereits an Fahrt verliert, bis es das (fernere) Ufer erreicht.
- **Fahrsituation (Einzelfahrt, Begegnung, Überholen):** Beobachtungen zeigen, dass die größten Belastungen i. d. R. durch ufernah fahrende Schiffe in der Einzelfahrt verursacht werden. Dies gilt auch für breite Kanäle. In denen können Begegnungen oder Überholvorgänge allerdings auch durchgeführt werden, ohne die Schiffsgeschwindigkeit stark reduzieren zu müssen. Deshalb können unter diesen Bedingungen solche Fahrten dann bemessungsrelevant werden.

- **Zulässige Schiffsgeschwindigkeiten:** Auf den Kanalstrecken der BWStr gelten unterschiedliche zulässige Schiffsgeschwindigkeiten. Sie sind meist differenziert nach Voll- und Leerfahren, wobei i. d. R. nur eine auf den Tiefgang bezogene Grenze angegeben ist. Verkehrsbeobachtungen zeigen, dass z. T. wesentlich größere Schiffsgeschwindigkeiten gewählt werden als zugelassen, wenn die Fahrzeuge diese erhöhten Geschwindigkeiten auf Grund der Motorleistung und der Querschnittsverhältnisse erreichen können. Umgekehrt kann es aber auch vorkommen, insbesondere bei modernen, abgeladenen Fahrzeugen, dass sie die zulässigen Schiffsgeschwindigkeiten auf Grund der kleinen n -Verhältnisse nicht immer erreichen können, d. h. die kritische Schiffsgeschwindigkeit ist begrenzend. Hierauf ist bei der Festlegung der Bemessungsgeschwindigkeit zu achten.

4.2.2 Empfehlungen für die hydraulische Bemessung

Relevante hydraulische Belastungen von Sohle und Ufer resultieren aus den im Folgenden beschriebenen Kenngrößen.

4.2.2.1 Primärwellenfeld

Es besteht aus folgenden Komponenten:

- **Wasserspiegelabsunk:** Er ist bei großen, voll abgeladenen Schiffen und Verbänden am größten und bestimmt folgende Größen:
 - Erforderliche Mindesttiefe des Deckwerks unter dem Ruhewasserspiegel (s. 6.10.3),
 - Flottwasser wegen des mit dem Absunk verbundenen fahrdynamischen Einsinkens der Schiffe in Fahrt; dadurch wird der Schraubenstrahlgriff auf die Sohle erhöht, wodurch die erforderlichen Steingrößen der Sohlensicherung bestimmt werden (s. 6.3),
 - Dauer, in der der Wasserspiegel fällt, und damit die Standsicherheit der Böschung; im Einzelfall ist zu untersuchen, ob eine kürzere Absunkdauer, die bei schnell fahrenden Schiffen im Bugbereich bei geringerem Absunk als beim Heck auftritt, zu ungünstigeren Bemessungsgrößen führt als eine längere Absunkdauer, die zwischen Bug und Heck auftritt und zu der ein größerer Heckabsunk gehört (s. 5.5.4.8).
- **Heckquerwelle:** Bei Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit kann die Heckquerwelle (s. 5.5.4.4), insbesondere bei ufernaher Fahrt, bei der die Wellenlänge abnimmt bzw. die Wellensteilheit und damit die Wellenhöhe zunimmt, brechen und den Rollbrecher (mitlaufender Wechselsprung) ausbilden. Dieser ist i. d. R. für Steinverlagerungen an Uferdeckwerken verantwortlich. Große Heckquerwellenhöhen werden insbesondere in folgenden Situationen verursacht:
 - Bei exzentrischer, insbesondere ufernaher Fahrt,
 - bei Leerfahren, die i. d. R. dynamisch hecklastig vertrimmen und Fahrzeugen, die hecklastig vorgetrimmt sind (Ballastfahrt),
 - bei einzeln fahrenden Schubbooten, Schleppern und Sportbooten, bei denen sich die am ggf. stumpfen Bug ausgelösten großen Schrägwellen mit der Heckquerwelle überlagern können (s. 5.5.5.1 Abstandsfall B und 5.5.5.2),
 - bei der Fahrt im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit, bei der i. d. R. eine dynamische hecklastige Vertrimmung auftritt, die den Wasserspiegelabsunk und damit die Heckwelle erhöht (s. 5.5.4.4) und bei der zusätzliche Heckquerwellen auftreten können, die dem gewellten Abflusszustand eines unvollkommenen Wechselsprungs entsprechen (s. 5.5.5.3),
 - bei für das Gleiten ausgelegten Sportbooten, die als Verdränger fahrend sich der Gleitgeschwindigkeit nähern, wobei sich die Querwellen des Bug- und Heckwellensystems überlagern (s. 5.5.5.1 Abstandsfall C und 5.5.5.4).

Die zugehörigen Druckgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten aus der Orbitalbewegung und dem stürzenden Wasser der gebrochenen Welle, die auch auf der Uferböschung auftreten, bestimmen die erforderliche Steingröße (s. 6.2). Selbst dann, wenn die Wellen überwiegend uferparallel laufen, d. h. nur durch Refraktion eine geringe Auflaufendenz aufweisen, bestimmt die Höhe der Welle über dem Ruhewasserspiegel, die wegen der asymmetrischen Form dieser Wellen wesentlich größer ist als die Tiefe des Wellentals, auch die erforderliche Höhe der Ufersicherung (s. 5.5.5.5).

Bei stark vorgetrimmten Fahrzeugen kann der größte Wasserspiegelabsunk im Bugbereich und nicht im Heckbereich auftreten. Auch in dieser Fahrsituation kann es zum Brechen der Welle kommen. Dieser Sonderfall der Böschungsbeanspruchung wird hier nicht behandelt.

- **Wiederauffüllungsströmung:** In der Nähe der Uferböschung ist der Rollbrecher i. d. R. von einer böschungsparellen Strömung begleitet, die die Absunkmulde von hinten her auffüllt. Die Geschwindigkeit dieser Wiederauffüllungsströmung u_{\max} kann im Grenzfall die Schiffsgeschwindigkeit erreichen (s. 5.5.4.5) und im Sinne turbulenter Fluktuationen sogar schwallartig überschreiten. Dies ist dann der Fall, wenn die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der Heckquerwelle auf Grund ihrer Eigendynamik bei großen Wellenhöhen so groß wird, dass sie droht, das Schiff zu überholen. Dies ist aber wegen der Bindung des Wellensystems ans Schiff nicht möglich, wodurch sie bricht. Dieser Effekt ist bei engen Kanalquerschnitten und ufernäher Fahrt im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit am stärksten. Dieser Fall kann wegen der größeren möglichen Schiffsgeschwindigkeit von Leerfahrern oder Schleppern, trotz der Tatsache, dass das Verhältnis u_{\max} / v_s kleiner als bei voll abgeladenen Schiffen ist, dennoch bemessungsrelevant sein (s. 6.6.2).
- **Rückströmung:** Die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit steigt mit der Schiffsgeschwindigkeit, der Verdrängung des Fahrzeugs und mit dem Kehrwert der wirksamen Querschnittsfläche. Die örtliche sohl- bzw. böschungsnähe Rückströmungsgeschwindigkeit ist gegenüber dem Mittelwert erhöht, bei herkömmlichen Binnenschiffen insbesondere im Bereich der Schiffskimm am Bug oder allgemeiner an allen starken Krümmungen der Schiffskontur, wenn diese der Sohle oder dem Ufer nahe kommen. An diesen Stellen treten auch große örtliche Wasserspiegelabsenkungen auf, die durch Einengung des Abflussquerschnitts die Rückströmungsgeschwindigkeit weiter vergrößern. Dies ist insbesondere im Bereich zwischen Schiffsseitenwand und geböschtem Ufer bei ufernäher Fahrt der Fall (s. 5.5.4.4). Es ist zu prüfen, welcher der nachfolgend genannten Belastungsfälle die größten Rückströmungsgeschwindigkeiten ergibt:
 - Ein zentrisch fahrendes, voll abgeladenes Schiff, wobei die dort tendenziell größere mögliche Schiffsgeschwindigkeit, zusammen mit der größeren Verdrängung, zu großen Rückströmungsgeschwindigkeiten führt,
 - die ufernahe Fahrt eines voll abgeladenen Schiffes, wobei zwar die Schiffsgeschwindigkeit tendenziell reduziert ist, aber der Einengungseffekt zum Ufer hin zu einer Erhöhung führt,
 - die schnelle Fahrt eines Leerfahrers in Ufernähe, wobei die größere Schiffsgeschwindigkeit, zusammen mit der stärkeren hecklastigen Vertrimmung solcher Fahrzeuge bedeutender sein kann als der geringere Verdrängungseffekt eines Leerfahrers gegenüber einem voll abgeladenen Schiff.

Der Einfluss eines exzentrischen Schiffspfades auf die Verteilung und damit die örtlichen Größtwerte der Rückströmungsgeschwindigkeiten ist im Vergleich zum Einfluss auf die Wellenhöhen gering.

Allgemein kann gesagt werden, dass der Rückströmungseinfluss in engen Kanälen, z. B. solchen für Richtungsverkehr, gegenüber dem Welleneinfluss hinsichtlich der erforderlichen Steingröße der Böschungssicherung an Bedeutung gewinnt. Für breite Kanäle ist i. d. R. die Höhe der Heckquerwelle bemessungsrelevant.

Grundlage der Ermittlung der vorher genannten hydraulischen Kenngrößen ist die eindimensionale Kanaltheorie (s. 5.5.3). Ihr liegen folgende wesentliche Vereinfachungen zu Grunde:

- Konstante Rückströmungsgeschwindigkeit über den Kanalquerschnitt,
- konstanter Wasserspiegelabsenk über die Schiffslänge,
- Wasserspiegelabsenk entspricht dem fahrdynamischen Einsinken (keine Vertrimmung),
- reibungsfreie Strömung.

Die eindimensionale Kanaltheorie liefert den Zusammenhang zwischen mittlerem Wasserspiegelabsenk, mittlerer Rückströmungsgeschwindigkeit und Schiffsgeschwindigkeit. Sie liefert auch einen Anhaltswert für die kritische Schiffsgeschwindigkeit.

Wegen der oben genannten Vereinfachungen werden Korrekturen zur Berücksichtigung folgender Einflüsse erforderlich:

- Flachwassersituation bei großen Kanalbreiten bzw. bei kurzen Schiffen im Vergleich zur Kanalbreite durch ein äquivalentes Kanalprofil und Näherungsformeln zur Veränderung der Wellenhöhe zwischen Schiff und Ufer (s. 5.5.1.1),
- Wasserspiegelneigung zwischen Bug und Heck sowie Schiffsform zur Erhöhung der Durchschnittswerte des Absunks und der Rückströmungsgeschwindigkeit, um die Maximalwerte am schiffsnäheren Ufer abzuschätzen (s. 5.5.4.2 - 5.5.4.4),
- exzentrische Fahrt durch ein kleineres äquivalentes Kanalprofil hinsichtlich der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit und der Mittelwerte von Absenk und Rückstrom,
- Schiffsform und dynamische Vertrimmung durch Erhöhung der Mittelwerte der hydraulischen Kennwerte (s. 5.5.4.3 und 5.5.4.4),

- Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Abhängigkeit von Schiffsgeschwindigkeit und Wellenhöhe (s. 5.5.4.5).

4.2.2.2 Sekundärwellenfeld

Die an Diskontinuitäten und starken Krümmungen der Schiffskontur ausgelösten Wellen werden in auseinanderlaufende Schräg- und in Querwellen unterteilt. Sie entstehen vornehmlich an Bug und Heck und bilden entlang einer vom Schiff schräg nach hinten verlaufenden Linie Interferenzen, an denen die größten Wellenhöhen auftreten. Das Schrägwellensystem konzentriert sich auf einen schmalen Streifen entlang dieser Linie. Aus energetischen Gründen nimmt es mit der Potenz $-1/3$ mit dem Abstand vom Schiff ab. Querwellen nehmen schneller, d. h. mit der Potenz von $-1/2$ zum Ufer hin ab. Deshalb liefert bei uferferner Fahrt das Schrägwellensystem i. d. R. die größten Wellenhöhen am Ufer, bei ufernaher Fahrt das Querwellensystem (s. 5.5.5).

Bemessungsrelevant ist i. d. R. der Fall, wenn das Schiff in einem solchen Abstand zum Ufer fährt, bei dem infolge Interferenzen genau am Ufer lokal größere Wellenhöhen als bei allen anderen Abständen auftreten. Deshalb muss, trotz der Tatsache, dass die Abnahme der Wellenhöhen dort noch am geringsten ist, nicht zwangsläufig die ufer nächste Fahrt die größten Wellenhöhen ergeben. Dies ist im Einzelfall zu prüfen (s. 5.5.5.1).

Das Sekundärwellensystem bestimmt

- den Wellenaufbau und damit die erforderliche größte Höhe der Böschungsbefestigung (s. 5.5.5.5), wobei die größten Wellen von schnellen Fahrzeugen mit stumpfer Bugform ausgelöst werden, von einzeln fahrenden, stark motorisierten Schubbooten, Schleppern oder Sportbooten und
- die Steingröße, die erforderlich ist, damit Erosion durch Wellenschlag vermieden wird (s. 6.4).

Weiterhin können sich die am Bug ausgelösten Sekundärwellen kurzer Schiffe am Ufer mit den Heckquerwellen überlagern (s. Abstandsfall B in 5.5.5.1). Große Heckwellen werden von Sportbooten, die für große Schiffsgeschwindigkeiten und damit für das Gleiten ausgelegt sind, beim Erreichen der Gleitgeschwindigkeit ausgelöst. Sie sind bei tiefgehenden, langen Sportbooten am größten (s. 5.5.5.2 und 5.5.5.4). Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob diese Wellen der Bemessung zu Grunde gelegt werden oder ob nicht Geschwindigkeitsbeschränkungen ausgesprochen und wirksame Geschwindigkeitskontrollen durchgeführt werden. Die hier angebotenen Gleichungen für die Wellenhöhen können auch zur Abschätzung zulässiger Schiffsgeschwindigkeiten genutzt werden, damit möglichst keine wellenbedingten Schäden entstehen.

4.2.2.3 Schraubenstrahl

Das erforderliche Steingewicht einer Sohlensicherung und im Sonderfall auch der Uferböschung wird durch die Größe der propulsionsbedingten Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt (s. 6.3). Die sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten sind am größten

- bei Schiffsschrauben mit großen Durchmessern und großen Konstruktionssteigungsverhältnissen,
- bei Schiffsschrauben mit großen Drehzahlen bzw. großem Leistungseinsatz,
- bei nicht ummantelten Propellern mit nachgeordnetem Zentralruder wegen der drallbedingten Strahlteilung,
- bei beschränkter Strahlausbreitung, z. B. in der Nähe einer Kaimauer und
- bei geringen Flottwassertiefen (s. 5.6.3).

Im Regelfall ist der maßgebende Belastungsfall ein auf der Stelle verharrendes oder anfahrendes Schiff, das z. B. bei einem Ablegemanöver die installierte Motorleistung vollständig einsetzt. Die Schraubstrahlbelastungen nehmen i. d. R. mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit ab.

Zu einer relevanten Belastung der Ufer aus dem Hauptantrieb von Schiffen kommt es z. B. bei Ablegemanövern wenn der Propellerstrahl durch das Hauptruder auf die Böschung gelenkt wird. Auch bei Wendemanövern kann eine starke Uferbelastung aus dem Hauptantrieb auftreten.

Der auf die Böschung gerichtete Strahl von aktiven Bugruderanlagen bei Ablegemanövern kann zu großen Schäden an unverklammerten Deckwerken durch lokale Auskolkungen führen (s. 5.6.5 und 6.3.2). Eine Bemessung der Deckwerke, die der Belastung von Bugstrahlrudern standhält, kann u. U. zu einer Überbemessung im Vergleich zu einer Bemessung ausschließlich für die sonstigen Beanspruchungen führen. Es ist zu prüfen, ob solche Schäden im Rahmen der Unterhaltungen zu beseitigen oder ob die Deckwerke in solchen Bereichen zu verklammern sind. In engen Kanälen, z. B. für Richtungsverkehr, kann der Strahl eines Bugstrahlruders nicht nur in der Manöversituation, sondern auch in der Streckenfahrt, wenn diese mit geringen Schiffsgeschwindigkeiten erfolgen muss, zu Uferschäden führen, die bei der Deckwerkbemessung zu beachten sind.

4.2.2.4 Empfehlungen für die hydraulische Bemessung im Regelfall

Unter Beachtung der heutigen Flotte (Stand 2003) auf deutschen Binnenwasserstraßen sowie der bisherigen Erfahrungen mit ausgeführten Deckwerken, führt die Bemessung gegen folgende Schifffahrtsbeanspruchungen im Regelfall zu einer ausreichenden Erosions- und Standsicherheit von Uferböschungen, wobei ein gewisses Mindestmaß an Unterhaltungsaufwand in Kauf genommen wird:

- Ufernahe Einzelfahrten (Fahrten über Böschungsfuß oder Fahrrinnenrand abzüglich Sicherheitsabstand) von
- beladenen GMS (Rückströmung, Rollbrecher und Wiederauffüllungsströmung bestimmen Steingröße; Absunk und Absunkzeit definieren die Deckwerksdicke und die erforderliche Tiefe der Befestigung unter dem Ruhewasserspiegel) und
- unbeladenen oder hecklastig ballastierten GMS (Rollbrecher und Wiederauffüllungsströmung an der Böschung bestimmen die Steingröße, Sekundärwellenhöhen die erforderliche Höhe der Uferbefestigung über dem Ruhewasserspiegel) sowie
- solchen GMS, die auf Grund ihrer Motorisierung die kritische Schiffsgeschwindigkeit erreichen können.

Bei Schraubenstrahlbelastung wird die Erosionssicherheit von Sohldeckwerken und Uferböschungen bei geringer Flottwassertiefe durch ein anfahrendes, d. h. in der maßgebenden Belastungssituation nur kurzzeitig an der Stelle verharrendes, stark motorisiertes Fahrzeug mit großem Schraubendurchmesser bestimmt. Böschungsbelastungen durch Bugstrahlruder sind insbesondere im Bereich von Liegestellen zu beachten. Durch Verklammerung können die Schäden minimiert werden.

Deckwerksbelastungen und Wellenaufbauhöhen aus schiffserzeugten Wellen durch einzeln fahrende Schubboote und Sportboote sind insbesondere dann zu berücksichtigen, wenn sie häufig auftreten oder durch flankierende Maßnahmen, z. B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, nicht wirksam begrenzt werden können.

4.3 Geotechnische Nachweise

Die geotechnischen Nachweise dienen der Ermittlung des Flächengewichts von Deckwerk bzw. Deckschicht.

- Als Bemessungswert für den Wasserstand muss die für den jeweiligen Nachweis ungünstigste Kombination aus Böschungsgeometrie und Wasserstand gefunden werden. Da das niedrigste n-Verhältnis beim unteren Betriebswasserstand erreicht wird, ist dieser i. d. R. auch maßgeblich für die geotechnischen Bemessung.
- Eine unplanmäßige Entleerung eines Kanals durch einen Schadensfall braucht bei der Bemessung der Böschungssicherung nicht berücksichtigt zu werden. Schäden auf benachbarte Bebauung infolge des Versagens der Böschungssicherung sind jedoch auszuschließen.
- Wird ein Kanalabschnitt planmäßig entleert, so kann die Böschungssicherung auf die dann auftretende Einwirkungskombination bemessen werden. Dabei können konstruktive Maßnahmen (z. B. Wasserhaltung) berücksichtigt werden.
- Strömungseinwirkungen werden bei der geotechnischen Bemessung nicht berücksichtigt.
- Der Wasserspiegelabsink aus Windstau ist in Kanälen durch den Wasserstand BW_u berücksichtigt.
- Für einen Wasserspiegelabsink aus Tideschwankungen, Schleusung oder anderen relativ langsam verlaufenden Wasserspiegeländerungen ist im Bereich der Böschung der maximal auftretende Unterschied zwischen abgesenkter Wasserspiegellage und Grundwasserstand anzusetzen.
- Als Wasserspiegelabsink infolge einer Schiffs vorbeifahrt ist der maximal mögliche Absink über dem Böschungsfuß bei der gewählten Bemessungsschiffsgeschwindigkeit anzusetzen, sofern die Randbedingungen für die Schifffahrt das Erreichen dieser Geschwindigkeit ermöglichen.
- Sekundärwellen, die bei einem Schiffsabsink auftreten, müssen nicht berücksichtigt werden.
- Für die Absinkgeschwindigkeit und die Absinkdauer von Windwellen oder Sekundärwellen der Schiffe sind folgende Formeln anzusetzen:

$$v_{za} = \pi H/T \quad (4-1)$$

$$t_a = T/2 \quad (4-2)$$

mit

H Wellenhöhe [m]

t_a Absinkdauer [s]

T Wellenperiode [s]

- Als Bemessungswert des Grundwasserstandes ist der maximal mögliche Grundwasserstand (z. B. aus langjährigen Messungen) anzusetzen.
- Bauzustände sind nur dann zu berücksichtigen, wenn sie zu noch ungünstigeren Einwirkungskombinationen führen.

5 Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen

Die nachfolgend in Kap. 5 vorgestellten Verfahren werden nicht benötigt, wenn für die zur Ermittlung der Steingröße und der Deckwerksdicke notwendigen hydraulischen Kennwerte aus Messdaten für alle relevanten Bemessungssituationen bekannt sind. Messdaten sind berechneten Werten vorzuziehen, denn letztere unterliegen folgenden Beschränkungen:

- (1) Sie resultieren i. d. R. aus Berechnungsverfahren, denen Annahmen über die maßgebenden physikalischen Prozesse zu Grunde liegen, die mit vereinfachten Grundgleichungen arbeiten und bei denen die Randgeometrie vereinfacht wird (z. B. wird das Strömungsfeld um ein fahrendes Schiff im äquivalenten Kanalprofil als eindimensional approximiert).
- (2) Notwendige empirische Korrekturen der mit den Vereinfachungen gewonnenen Bemessungsansätze, mit denen z. B. das Aufsteilen der Wellenhöhen bei ufernaher Fahrt berücksichtigt wird, gelten nur für den Bereich der zu Grunde liegenden Messdaten.
- (3) Nicht für alle hier angegebenen Verfahren liegen Erfahrungen über die Anwendbarkeit für relevante Bemessungsfälle vor (z. B. für die Wellenhöhen von Sportbooten).

Deswegen werden nachfolgend zum Teil mehrere Berechnungsverfahren angeboten, die gleich plausibel erscheinen, oder mit denen unterschiedliche Bemessungsaspekte beleuchtet werden können, z. B. der Einfluss der Böschungsneigung oder der Wellensteilheit auf die Stabilität des einzelnen Deckwerkssteines. Es ist der Verantwortung des Projektingenieurs überlassen, aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse aus gleich wahrscheinlichen Verfahren die maßgebende Bemessungsgröße auszuwählen.

Zur Genauigkeit der Berechnungsverfahren ist anzumerken, dass die aus dem Primärwellenfeld resultierenden Belastungen genauer ermittelt werden können als die aus dem Sekundärwellenfeld, aus der Wiederauffüllungsströmung und aus den Windwellen. Eine besondere Schwierigkeit bereitet die Ermittlung der Belastung aus den Propulsionsorganen der Schiffe, da diese besonders stark von der Schiffskonstruktion abhängig sind und nicht alle Sonderfälle behandelt werden können.

5.1 Allgemeines

Für die Bemessung von Deckschichten in den nachfolgenden Kapiteln 6 und 7 gegen die möglichen hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett werden folgende Bemessungsparameter benötigt:

- a) für die hydraulische Bemessung (Kap. 6)
 - maximale Wellenhöhe
 - maximale Strömungsgeschwindigkeit
- b) für die geotechnische Bemessung (Kap. 7)
 - maximaler schneller Wasserspiegelabsunk oder Porenwasserüberdruck im Boden
 - maximale Absunkgeschwindigkeit

Die Größe dieser Parameter kann entweder durch Messungen oder auch rechnerisch bestimmt werden.

Nachfolgend werden Rechenverfahren und Hinweise für die Ermittlung der Größen folgender hydraulischer Einwirkungen und ihrer Reaktionsgrößen im Boden angegeben:

- Wellenhöhe (Wind, Schifffahrt)
- Rückströmung der Schiffe
- Schraubenstrahl von Schiffen
- schneller Wasserspiegelabsunk durch Schifffahrt
- schneller Wasserspiegelabsunk infolge Wehr-, Schleusen- oder Kraftwerksbetriebes
- schneller Wasserspiegelabsunk in Verbindung mit dem Ablauf einer Hochwasserwelle

Außerdem werden für die Bemessung bestimmte Eingangsparameter der Wasserstraße und der Schifffahrt sowie meteorologische Eingangsparameter benötigt, für deren Ermittlung nachfolgend ebenfalls Hinweise gegeben werden.

5.2 Daten zur Wasserstraße

5.2.1 Gewässergeometrie

Die Geometrie des Gewässers oder des Kanals beeinflusst sowohl natürliche als auch schiffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen. Daher müssen für die Standsicherheitsnachweise Abmessungen, Ausbildung und Verlauf der Wasserstraße im betrachteten Abschnitt bekannt sein.

Da die nachfolgend geschilderten Berechnungsverfahren für Trapezprofile gelten, müssen unregelmäßige Gewässerquerschnitte, wie sie u. a. bei Flüssen vorkommen, durch geeignete Trapezprofile angenähert werden. Hierzu wird auf **Anhang C** verwiesen. Kanalquerschnitte weisen i. d. R. schon einen trapezförmigen Querschnitt auf und können deshalb unverändert für die Berechnungen verwendet werden. Hierzu gelten die 'Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen' /BMV 1994/.

5.2.2 Fahrrinnengeometrie

Mindestwerte für **Fahrrinnenbreiten** sind den 'Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen' /BMV 1994/ zu entnehmen.

Die **Fahrrinnentiefe** ist von der Wasserstraßenklasse abhängig, die in der CEMT-Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen /BMV 1996/ angegeben ist.

Für die Ermittlung der schiffahrtserzeugten hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett muss die Fahrrinne festliegen und müssen die Positionen des Bemessungsschiffes sinnvoll gewählt werden.

5.2.3 Wasserstand

Wesentliche Eingangsgröße für die Ermittlung der hydraulischen Belastungsgrößen und die darauf basierende hydraulische Bemessung (Kap. 6) sowie der geotechnischen Bemessung (Kap. 7) ist der lokal relevante Wasserstand. Dieser kann durch viele Faktoren bestimmt sein:

- Hydrologie
- Gewässerhydraulik
- Wasserwirtschaft
- sonstige Wellen (s. 5.7)
- betriebstechnische Vorgänge

Im Einzelfall sind hierzu vor der Bemessung gründlich Erkundigungen einzuholen.

5.3 Daten zum Schiff

Wichtige Eingangswerte für die Ermittlung der hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett sind Länge, Breite und Tiefgang sowie installierte Maschinenleistung und Schraubendurchmesser des Bemessungsschiffes. Gültige Obergrenzen für die gängigen Wasserstraßenklassen sind in /BMV 1996/ angegeben. Angaben für Küstenmotorschiffe, Schubleichter und Schubverbände sind in der /EAU 2004/ enthalten. Gängige Werte für häufig anzutreffende Binnenschiffe sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Bei der Festlegung der Schiffsabmessungen ist darauf zu achten, welche Arten von Schubverbänden im untersuchten Bereich verkehren. Es können auch GMS als Koppelverbände vorkommen.

Während bei Normalfahrt der Schraubenstrahl für die Böschungs- und Sohlensicherungen keine maßgebende Einwirkung darstellt, können sie bei Manövrierfahrt (z. B. An-, Ablegen, Wenden usw.) durch den Schraubenstrahl des Hauptantriebs bzw. durch Bugstrahlruder beschädigt werden. Für die Bemessung auf diese Einwirkung müssen Propellerdurchmesser, Propellerdrehzahl, Propelleranzahl und Schubbeiwert des Propellers/Bugstrahlruders oder der Propellerdurchmesser und die Antriebsleistung der zu berücksichtigenden Schiffstypen bekannt sein; Anhaltswerte sind in Tabelle 5.1 enthalten.

Tabelle 5.1 Technische Daten von (a) heutigen Binnenfahrzeugen (Anhaltswerte; für zukünftige Binnenschiffe sind Daten zu erfragen) und (b) Bugstrahlrudern

(a) Technische Daten von Binnenfahrzeugen

Schiffstyp		Länge/ Breite / max. Tiefgang	Propeller- durch- messer	ungefähre Nenn- leistung	Nenn- drehzahl des Propellers
Abk.	Name				
-	-	L/B/T	D	P _{d,Nenn}	N _{Nenn}
-	-	[m/m/m]	[m]	[kW]	[1/min]
Gütermotorschiffe					
üGMS	übergroßes Großmotor-güterschiff	115-135 / 11,45-12 / 2,5-2,8	1,70	2 x 800	310 - 400
GMS	Großmotor-güterschiff / Großes Rheinschiff	95-110 / 11,4 / 2,5-2,8	1,70	1200	310 - 400
ES	Europaschiff (Johann Welker)	80-85 / 9,5 / 2,5	1,70	550	250 - 310
MS	Motorschiff (Gustav Königs)	67-80 / 8,2 / 2,5	1,50	375	270 - 340
-	Kempenaar	50-55 / 6,6 / 2,5	1,30	≈ 200	290 - 370
-	Peniche	38,5 / 5,05 / 1,8-2,2	1,10	150	330 - 420
Schubboote und Schlepper					
SB	Klein-schubboot 1 bzw. 2 Propeller	Bei Hersteller bzw. Reederei zu erfragen	1,50	375 bzw. 750	270 - 340
SB	Strecken-schubboot klein 2 Propeller		1,70	750 - 1500	280 - 350
SB	Strecken-schubboot groß 2 bzw. 3 Propeller		1,85	2 x 750 = 1500 bzw. 3 x 875 = 2625	240 - 300 bzw. 250 - 320
SB	Groß-schubboot (Niederrhein) 2 bzw. 3 Propeller		2,10	2 x 1313 = 2625 bzw. 3 x 1500 = 4500	240 - 300 bzw. 250 - 310
-	Schlepper (Beispiel)	31 / 5 / 2,2	1,50	290	275
Leichter					
-	Europa I	70 / 9,5 / 2,5	-	-	-
-	Europa II	76,5 / 9,5 / 2,5	-	-	-
sonstige Wasserfahrzeuge					
FGS	Fahrgastschiff (Beispiel)	34 / 6,6 / 1,2	0,80	2 x 180	1700
FKS	Flusskreuz-fahrtschiff ¹⁾ (Beispiel)	70 / 10 / 1,2	1,00	2 x 250	400
-	Yacht (Beispiel)	14 / 4 / 0,8	0,60	2 x 250	700
-	Sportboot (Beispiel)	6 / 2 / 0,3	0,30	50	200

Erläuterungen:

¹⁾ auch: Hotelschiff

(b) Technische Daten von Bugstrahlrudern

Schiffstyp		Installierte Leistung	Propeller- durch-messer
Abk.	Name		
-	-	P _{Bug}	D
-	-	[kW]	[m]
üGMS	übergroßes Großmotor-güterschiff	250 - 500	1,00
GMS, -	Großmotorschiff, Leichter I + II	150 - 250	0,90
ES	Europaschiff	≈ 150	0,80

Soweit für das Bemessungsschiff keine genaueren Werte vorliegen, können für Binnenschiffe Propellerdrehzahlen zwischen $n = 300$ [1/min] (große Propellerdurchmesser) und $n = 500$ [1/min] (kleine Propellerdurchmesser) angenommen werden. Für Schubschiffe müssen die zutreffenden Werte erfragt werden. Die in Tabelle 5.1 angegebenen Nenndrehzahlen sind Näherungswerte und können in Einzelfällen um 20 % überschritten werden. Die unteren Grenzwerte gelten für Düsenpropeller.

Bugstrahlruder sind i. d. R. mit dem Schiffsboden bündig eingebaut. Weiter sind Sonderformen zu beachten wie Pumpjets. Der Strahl tritt dabei mit einer Geschwindigkeit von bis zu 14 m/s aus und trifft in einem Winkel von 8° - 17° auf die Sohle.

5.4 Schifffahrtsbedingte hydraulische Einwirkungen

5.4.1 Komponenten

Die schifffahrtsbedingten hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett entstehen durch

- Wasserspiegelabsenk,
- Schiffswellen (Primär- und Sekundärwellensystem),
- Rückströmung (Verdrängungsströmung) und
- Schraubenstrahl (Propulsionsströmung).

Den einzelnen Faktoren, die im Regelfall stets gleichzeitig wirken, kommt in Abhängigkeit von der Art und dem Ausmaß der Fahrwasserbeschränkung (seitlich unbegrenztes Flachwasser oder seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser = Kanalfall) und dem von der Schifffahrt genutzten Geschwindigkeitsbereich (unterkritisches, kritisches oder überkritisches Geschwindigkeitsgebiet) unterschiedliche Bedeutung hinsichtlich der Wirkung auf das Gewässerbett zu (s. 4.2.2).

5.4.2 Fahrsituationen

Für die Bemessung sind die beiden im Folgenden beschriebenen Fahrsituationen zu unterscheiden, wobei in beiden Fällen ein quasistationärer Zustand mit unveränderlicher Schiffsgeschwindigkeit betrachtet wird.

5.4.2.1 Normalfahrt

Üblicherweise findet Schifffahrt auf freier Strecke mit gemäß BinSchStrO zugelassener oder mit technisch möglicher Schiffsgeschwindigkeit statt. In vielen Gewässern ist die Schiffsgeschwindigkeit aufgrund der Motorisierung und der hydraulischen Randbedingungen nach oben begrenzt. Die zugelassenen Schiffsgeschwindigkeiten können je nach Gewässer sehr unterschiedlich sein. In vielen Kanälen mit Ausbauprofilen für moderne Schiffe (DEK, MLK, RHK, WDK u. a.) gelten z. B. folgende, nur vom Tiefgang abhängige Werte (s. § 15.04 BinSchStrO):

$$T < 1,3 \text{ m} \quad v_{\text{zul}} = 12 \text{ km/h}$$

$$T > 1,3 \text{ m} \quad v_{\text{zul}} = 10 \text{ km/h}$$

Bei kleineren Kanalquerschnitten ist v_{zul} geringer.

Die Fahrt kann mittig oder außermittig sein. Einer mittigen Fahrt mit geringem Tiefgang ist theoretisch die höchste kritische Schiffsgeschwindigkeit zugeordnet. Mit zunehmendem Tiefgang und/oder mit zunehmend exzentrischer Fahrt (= größere Ufernähe) nimmt die kritische Schiffsgeschwindigkeit tendenziell ab. Zum Einfluss der Exzentrizität ist Folgendes zu beachten:

- (1) Zur Berücksichtigung der instationären Fahrsituation im Kanal bei Annäherung an das Ufer, bei der das Fahrzeug die in Kanalmitte größere mögliche Schiffsgeschwindigkeit zum Ufer hin mitnimmt, wird dieser Einfluss der Exzentrizität, der bei stationärer Fahrt zu einer Minderung der erreichbaren Schiffsgeschwindigkeit führen würde, nachfolgend vernachlässigt.
- (2) Unter Flachwasserbedingungen wird der dabei wesentlich größere Einfluss der Exzentrizität des Schiffs-pfades bzw. der Nähe des Ufers auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit dagegen berücksichtigt.
- (3) Grundsätzlich, d. h. sowohl bei Kanalfahrt als auch bei der Fahrt mit Flachwassereffekten, ist der Einfluss der Exzentrizität auf den Wasserspiegelabsenk und die Wellenhöhe im Böschungsbereich zu berücksichtigen.

Bei der Festlegung der Bemessungssituationen sind deshalb Tiefgang und Uferabstand als wesentliche Einflussgrößen zu beachten.

Ein Einzelfahrer bewegt sich i. d. R. mittig oder außermittig am Rand einer an der Kanalachse orientierten Einzelfahrspur (s. Bild 5.1 a/b). Hierbei wird im Regelfall als Bemessungswert der Schiffsgeschwindigkeit $0,97 v_{krit}$ für die mittige Fahrt vorgeschlagen. In der Vorbereitungsphase für Begegnung oder Überholung kann das Schiff auch am äußersten Rand der nach Richtlinien für Standard-Kanalprofile /BMV 1994/ vorliegenden Doppelfahrspur fahren (s. Bild 5.1 c). Die Schiffskimm am Hauptspant liegt dabei über dem Böschungsfuß. Bei 2,8 m Abladetiefe, 0,5 m Squat und 0,2 m Mindestflottwasser entspricht dies gemäß den Richtlinien einem seitlichen Sicherheitsabstand von 1,5 m zur Uferböschung. Von diesem Wert kann auch für andere Kanalquerschnitte ausgegangen werden, um die Schiffposition der ufernahen Fahrt festzulegen. Auch für eine exzentrische Fahrposition ist in der Phase der Einzelfahrt von der o. g. Schiffsgeschwindigkeit auszugehen.

Auf die Sonderfälle Begegnung und Überholung wird in 5.5.6 eingegangen.

Die Anwendungsgrenze der Modellverfahren liegt hinsichtlich des mittleren Tiefgangs T und der Wassertiefe h bei $T \geq 1/3 h$.

Die aus diesen Fahrtbedingungen folgenden maßgebenden hydraulischen Einwirkungen auf das Gewässerbett bzw. die Böschungs- und Sohlensicherung sind

- Wasserspiegelabsink infolge des vom Schiff erzeugten Schiffswellensystems und
- Wellenauflauf und -ablauf an den Uferböschungen infolge des vom Schiff erzeugten Wellensystems.

Weitere hydraulische Belastungen sind

- Rückströmung und
- Propellerstrahl (Abnahme mit steigendem Propellerfortschrittsgrad, d. h. Verringerung mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit).

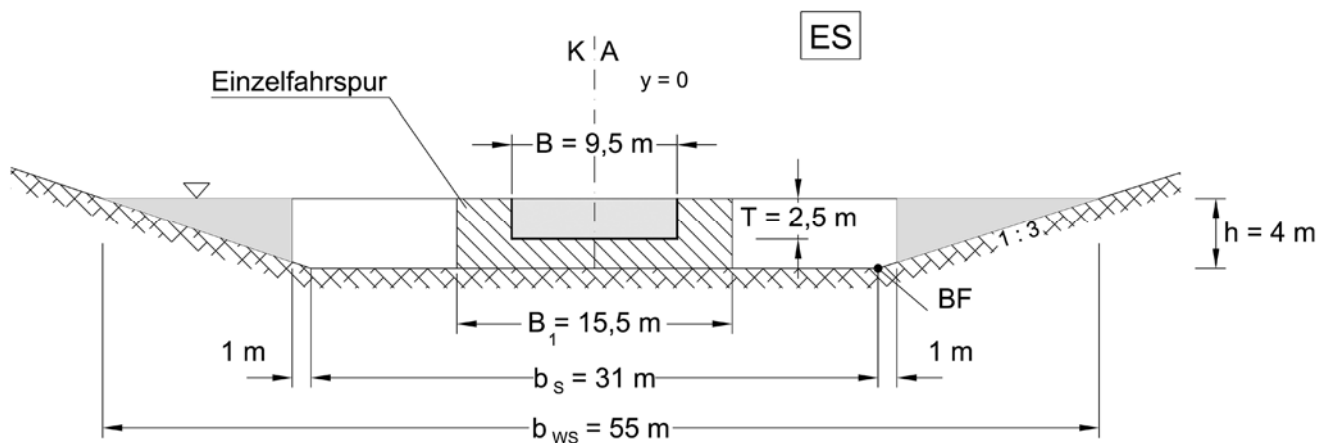
5.4.2.2 Manövrierfahrt

Das Schiff manövriert mit geringer Geschwindigkeit $v_s \cong 0$ (Fortschrittsgrad des Propellers $J = 0$) mit maximalem Propellerschub in folgenden Situationen:

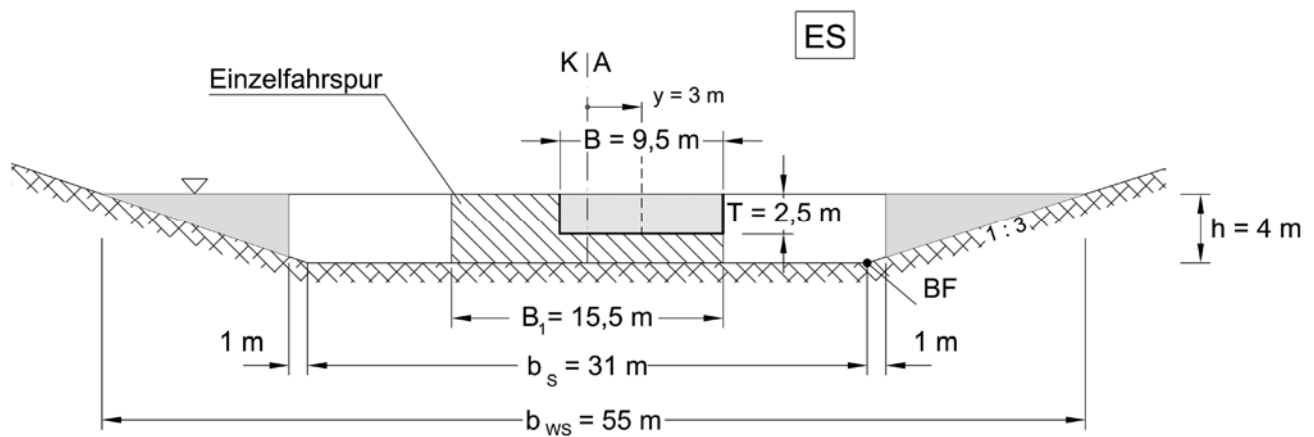
- An- und Ablegemanöver
- Beschleunigungsphase bei Schleusenausfahrten (standprobenähnliche Situation)

Dabei resultiert die maßgebende hydraulische Einwirkung auf das Gewässerbett bzw. die Böschungs- und Sohlensicherung aus den Propellerstrahlen von Haupt- und Bugstrahlruder, die auf Böschung und Sohle auftreffen.

a) Europaschiff ES mittig, ohne Driftwinkel



b) Europaschiff ES außermittig über Rand der Einzelfahrspur ($B_1 = 15,5$ m), ohne Driftwinkel



c) Großmotorschiff GMS am äußeren Rand der Fahrspur, ohne Driftwinkel

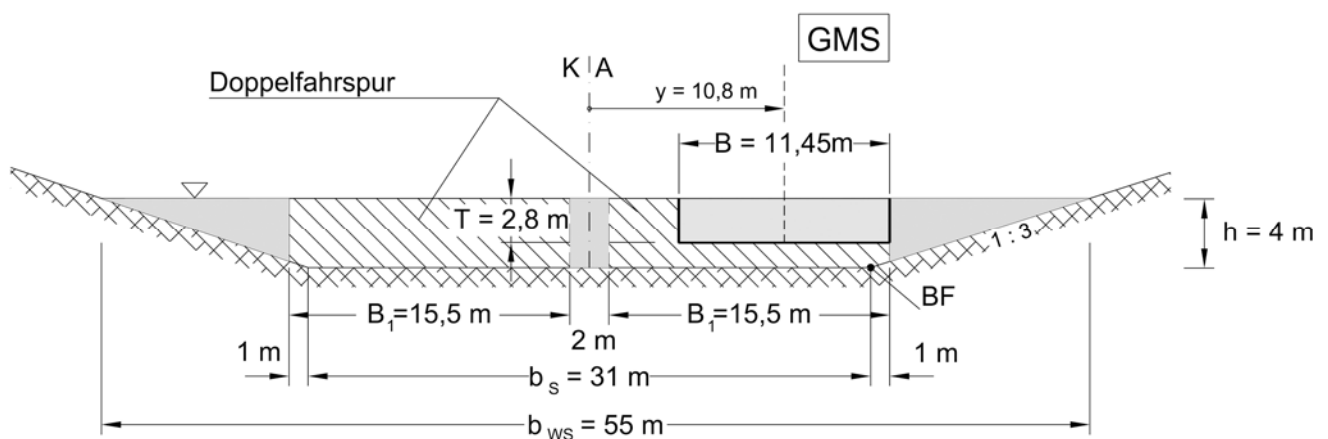


Bild 5.1 Beispiele für betrachtete Positionen der Schiffe ES und GMS im Regeltrapezprofil

Abkürzungen: KA - Kanalachse

BF - Böschungsfußpunkt

Symbole: B - Schiffsbreite

B_1 - Breite der Einzelfahrspur

b_s - Sohlenbreite

b_{ws} - Wasserspiegelbreite

h - Wassertiefe

T - Tiefgang des Schiffes

5.5 Größe von Schiffswellen (Bemessungssituation "Normalfahrt")

Das Primärwellenfeld um ein fahrendes Schiff ist ungleichförmig verteilt. In der Flachwasserfahrt tritt die größte Rückströmungsgeschwindigkeit unmittelbar am Schiff auf und klingt mit größer werdendem Abstand vom Schiff rasch ab. Bei ufernaher Fahrt mit Flachwassereinfluss tritt dieser Effekt am schiffnäheren Ufer nicht auf. Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit können dort sogar größer sein als in Schiffsnähe. Bei der Kanalfahrt ist die Ungleichförmigkeit der Rückströmungs- und Absunkverteilung dagegen gering.

Zur rechnerischen Erfassung der Ungleichförmigkeit des Rückströmungsfeldes wird von der Vorstellung ausgegangen, dass sich die gesamte Rückströmung auf die Einflussbreite b_E konzentriert, d. h. in einem äquivalenten Kanalprofil erfolgt, und dort die Werte in Schiffsnähe annimmt. Dadurch wird die Anwendung der eindimensionalen Kanaltheorie ermöglicht. Sie liefert Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit in Schiffsnähe und damit auch die kritische Schiffsgeschwindigkeit.

In 5.5.1.1 werden Näherungsformeln zur Ermittlung der Querschnittsfläche dieses äquivalenten Kanalprofils in Abhängigkeit von der Schiffslänge, der Kanalbreite und dem Uferabstand als wesentliche Einflussparameter angegeben. Grundlage dieser Näherungsformeln ist die ebene Potenzialtheorie eines durch eine Quellen-Senken-Strömung angenäherten Schiffes /BAW 2009/ (Herleitung s. **Anhang D**).

Auf der gleichen Basis werden in 5.5.1.1 Näherungsformeln – grafisch umgesetzt in Bild 5.7 – zum Verhältnis des Absunks am Ufer zu dem am Schiff angegeben. Unter Beachtung dieses Verhältnisses wird die hydraulisch äquivalente Böschungsneigung des als Trapezprofil approximierten äquivalenten Kanalprofils gewählt. Hieraus ergibt sich auch die mittlere Wassertiefe dieses Profils. Der zugehörige, für die Anwendung der 1D-Kanaltheorie erforderliche effektive Schiffsquerschnitt wird in 5.5.1.2 unter Berücksichtigung der Abladetiefen an Bug und Heck und des Verdrängungseffektes der Grenzschicht ermittelt.

In 5.5.2 wird aus diesen Daten die kritische Schiffsgeschwindigkeit berechnet. Sie bildet die Grundlage zur Wahl der Bemessungsschiffsgeschwindigkeit, die i. d. R. als Prozentsatz der kritischen Schiffsgeschwindigkeit festgelegt wird. In 5.5.3 werden dann für diese Geschwindigkeit im äquivalenten Kanalprofil der mittlere Wasserspiegelabsunk und die mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit bei mittlerer Fahrt ermittelt. Unter Berücksichtigung der in 5.5.1.1 angegebenen, grafisch in Bild 5.7 umgesetzten Näherungsgleichungen werden daraus die Werte am Ufer berechnet. Anschließend werden in 5.5.4.3 Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit um die Einflüsse aus dem Wasserspiegellängsgefälle zwischen Bug- und Heckbereich und aus dem dynamischen Trimm korrigiert. Dies ist notwendig, weil die hier verwendete eindimensionale Kanaltheorie einer Potenzialströmung das Wasserspiegellängsgefälle unberücksichtigt lässt.

Mit dem so erhaltenen Maximalwert des örtlichen Wasserspiegelabsunkes wird aus der Kontinuitätsgleichung die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Ufer errechnet. Abschließend werden die Bemessungswerte der Wellenhöhen an Bug und Heck ermittelt (s. 5.5.4.4). Hierbei ist der Einfluss von Wellensteilheit und Shoa-ling-Effekten auf die Wellenhöhen zu beachten. Dies kann durch eine empirische Formel für den Einfluss der Exzentrizität des Schiffspfades berücksichtigt werden /PIANC 1987a/.

Ein Überblick über die gesamte bis hier geschilderte Vorgehensweise ist auf Bild 5.2 skizziert.

Nachfolgend werden in 5.5.4.5 - 5.5.4.8 weitere Aspekte des Primärwellenfeldes beleuchtet: Wiederauffüllungsströmung, Einfluss des Driftwinkels, Einfluss der Grundströmung und Absunkgeschwindigkeit. In 5.5.5 werden schließlich Sekundärwellen behandelt, die i. d. R. vom Primärwellenfeld getrennt auftreten. Sie können deshalb als eigenständige Belastungsgrößen betrachtet werden.

In 5.6 - 5.7 werden hydraulische Sonderbelastungen der Kanalauskleidung betrachtet wie Schraubenstrahl, Windwellen und sonstige Wellen (Schwall und Sunk, Hochwasserwelle). In 7.1.3 werden die Porenwasserüberdrücke ermittelt, die für die geotechnischen Nachweise erforderlich sind.

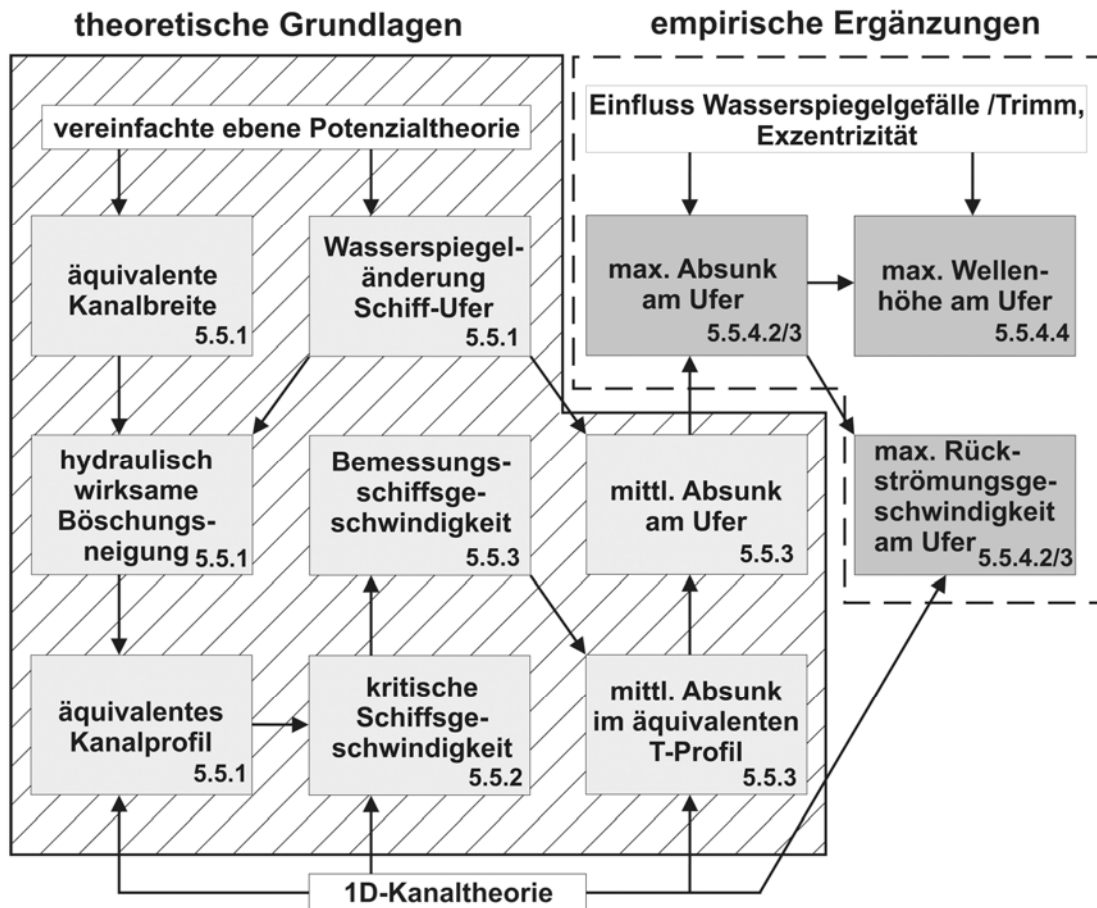


Bild 5.2 Vorgehensweise zur Ermittlung der hydraulischen Bemessungsgrößen wie maximale Rückströmungsgeschwindigkeit und maximale Wellenhöhen aus dem Primärwellenfeld fahrender Schiffe bei Flachwasser- und Grenzschichteinflüssen mit Angabe der zugehörigen Kapitel

5.5.1 Hydraulisch wirksamer Kanal- bzw. Schiffsquerschnitt

5.5.1.1 Flachwassereinfluss

Der maßgeblich an Absunk und Rückstrom beteiligte Bereich des Gewässerquerschnitts, der das äquivalente Kanalprofil bestimmt, ist abhängig von der **rechnerischen** Gewässerbreite

$$b_r = A/h \quad (5-1)$$

mit

A Fließgewässerquerschnitt unmodifiziert [m²]

h Wasserspiegelhöhe [m] vgl. Bild 5.3

nach Bild 5.3, der wirksamen Einflussbreite b_E des Rückströmungsfeldes und der Schiffsposition (Exzentrizität) innerhalb des Gewässerquerschnitts. Dabei ergeben sich drei Breitenfälle, die in Bild 5.3 skizziert sind. Die Fallunterscheidungen und die zugehörigen Berechnungsgrundlagen gelten für Verhältnisse von Wassertiefe zu Tiefgang von $1,25 \leq h/T \leq 5$ /Kriebel 2003/ und von Schiffslänge zu Schiffsbreite $L/B \geq 5$.

Für die praktische Anwendung empfiehlt sich eine Skizze mit den Abmessungen von Querprofil, Einflussbreite und Schiffsposition zur Zuordnung des Falls.

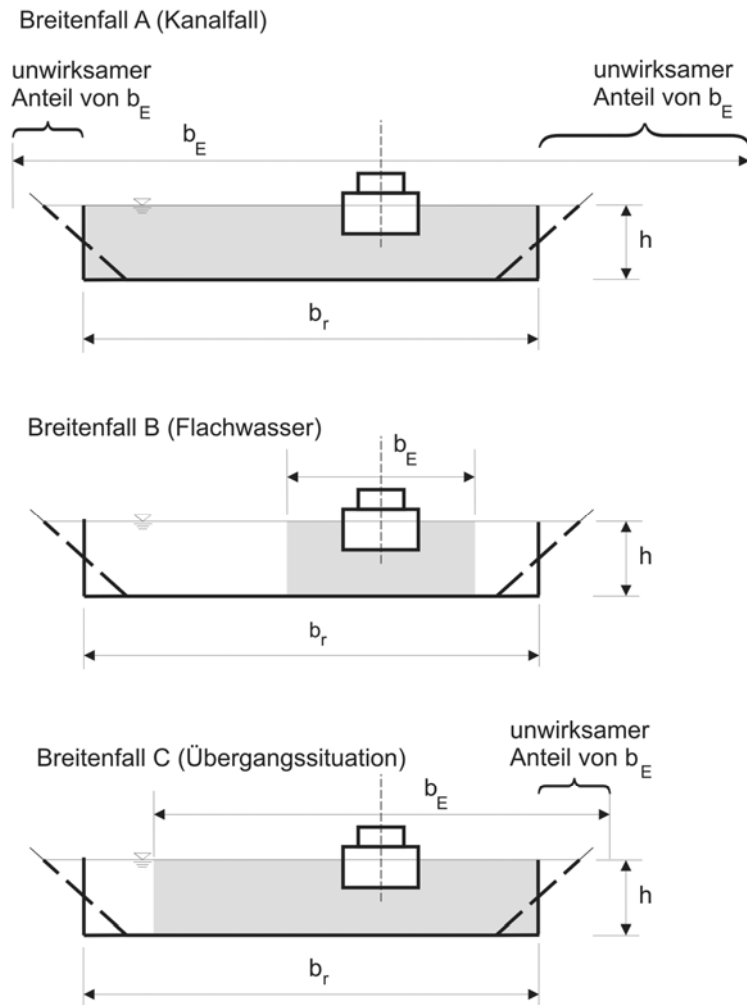


Bild 5.3 Grundfälle für das Verhältnis von Einflussbreite b_E des Rückströmungsfeldes (s. Gl. (5-7)) zur rechnerischen Gewässerbreite b_r (eines Rechteckprofils gleichen Querschnitts bei gleicher Wassertiefe) (s. Gl. (5-1)):
 A: Kanalfall: $b_E > b_r$
 B: Flachwasser: $b_E < b_r$
 C: Übergangssituation: b_E überdeckt ein Ufer

Breitenfall A: „Kanalfall“ → lange Schiffe, schmale Kanäle

Für im Vergleich zur Kanalbreite lange Schiffsgefäße wirkt die Rückströmung über die gesamte Kanalbreite. Für die folgenden Berechnungen auf der Basis der eindimensionalen Kanaltheorie kann deshalb das Kanalprofil mit den Abmessungen

b_{WS} Wasserspiegelbreite im Kanal [m]

h Wassertiefe [m]

m Böschungsneigung [-] entspricht Kotangens des Böschungswinkels β ($\tan \beta = 1/m$)

unmodifiziert verwendet werden:

$$A_{K,\text{äqui}} = A_K \quad (5-2)$$

$$A_{S,\text{äqui}} = A_{S,\text{eff}} \quad (5-3)$$

$$m_{K,\text{äqui}} = m \quad (5-4)$$

mit

A_K Kanalquerschnitt [m^2], $A_K = h (b_{WS} - m h)$

$A_{K,\text{äqui}}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m^2]

$A_{S,\text{äqui}}$ äquivalenter Schiffsquerschnitt [m^2]

$A_{S,\text{eff}}$ effektive Querschnittsfläche des Schiffs [m^2],
ggf. unter Berücksichtigung von Grenzschichteinflüssen und Driftwinkel

$m_{K,\text{äqui}}$ äquivalente Böschungsneigung [-]

Diese als Kanalfall bezeichnete Situation tritt auf, wenn der größere Abstand $u_{r,\text{max}}$ (s. Bild 5.4) zwischen Schiffsachse und gedachtem Ufer eines bei gleicher Wassertiefe flächengleichen Rechteck-Profiles (R-Profil) folgender Bedingung genügt:

$$u_{r,\text{max}} \leq \frac{b_E}{2} \quad (5-5)$$

mit

$u_{r,\text{max}}$ maximaler Uferabstand im äquivalenten Rechteckprofil [m] (s. Bild 5.4)

b_E Einflussbreite des Rückströmungsfeldes [m]

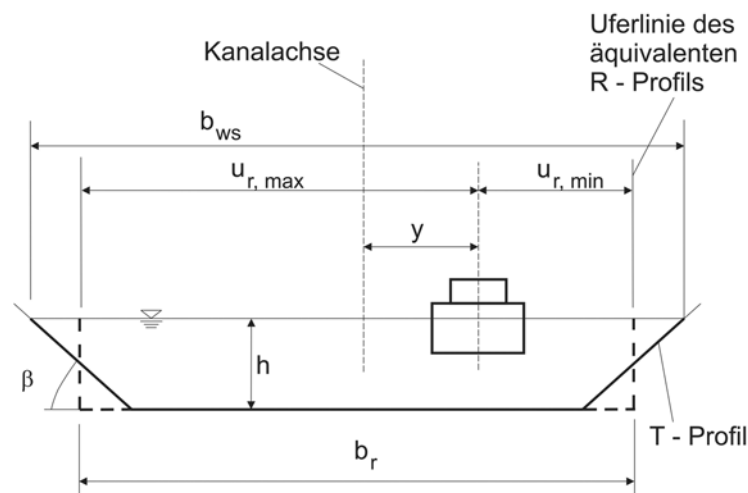


Bild 5.4 Definition der Uferabstände $u_{r,\text{min}}$ und $u_{r,\text{max}}$ zu den Uferlinien des rechnerischen R-Profiles

Bei einem Trapezprofil mit gleichen Böschungsneigungen an beiden Ufern gilt:

$$\begin{cases} b_r = b_{WS} - m h \\ u_{r,\text{min}} = \frac{1}{2} b_r - y \\ A = b_r h \end{cases} \quad (5-6)$$

Für b_E gilt folgender, vom Schiffstyp abhängiger Ansatz:

Einflussbreite b_E des Rückströmungsfeldes [m]

$$b_E = \frac{\pi}{2} (L + f_B B) \quad (5-7)$$

mit

B Schiffsbreite [m]

f_B Faktor der Einflussbreite [-], abhängig vom Schiffstyp

$f_B = 3$ übliches Binnenschiff

$f_B \approx 1,5$ modernes, binnengängiges Seeschiff; Schiff mit Bugwulst

$f_B = 0$ Schiffsgrundriss ellipsenförmig (entsprechend der Theorie)

L Schiffslänge (über alles) [m]

Den nachfolgend für genauere Berechnungen angebotenen Graphiken in Bild 5.6 und Bild 5.7 liegt Gl. (5-7) für $f_B = 3$ zu Grunde.

Um sie im allgemeinen Fall, d. h. für $f_B \neq 3$, anwenden zu können, ist das Verhältnis L / B in Bild 5.6 und Bild 5.7 durch L_{eff} / B zu ersetzen. Für schlanke Schiffe gilt für die effektive Schiffslänge:

effektive Schiffslänge L_{eff} [m]

$$L_{\text{eff}} = L + B(f_B - 3) \quad (5-8)$$

Schon im Kanalfall können geringe Flachwassereffekte auftreten. Diese können hinsichtlich der äquivalenten Querschnittsfläche für eine genauere Berechnung nach Bild 5.6, das aus der vereinfachten ebenen Potenzialtheorie abgeleitet wurde, berücksichtigt werden. Die äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,\text{äqui}}$ ergibt sich dabei aus

äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,\text{äqui}}$

$$A_{K,\text{äqui}} = b_{r,\text{äqui}} h \quad (5-9)$$

mit

$b_{r,\text{äqui}}$ rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils [m]

h Wassertiefe [m]

Die Veränderung der Rückströmungsgeschwindigkeit und des Absunks zwischen Schiff und Ufer ist im Kanalfall gering und kann i. d. R. vernachlässigt werden. Beim Übergang vom Breitenfall A zu den Breitenfällen B und C kann für eine genauere Berechnung wie folgt vorgegangen werden:

Die mit der äquivalenten Kanalquerschnittsfläche ermittelten Kenngrößen

- mittlere Wasserspiegelabsenkung $\Delta \bar{h}$ nach Gl. (5-24) in 5.5.3 und
- mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{rück}}$ nach Gl. (5-23) in 5.5.3

verringern bzw. erhöhen sich zwischen Schiff und Ufer (Index 'u') auf neue Werte (s. Gl.n (5-26) und (5-27)):

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h} &\rightarrow \Delta \bar{h}_u \\ \bar{v}_{\text{rück}} &\rightarrow \bar{v}_{\text{rück,u}} \end{aligned}$$

mit

$\Delta \bar{h}$ in Längs- und Querrichtung gemittelte Wasserspiegelabsenkung [m]

$\Delta \bar{h}_u$ in Längsrichtung am Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung [m]

$\bar{v}_{\text{rück}}$ in Längs- und Querrichtung gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s]

$\bar{v}_{\text{rück,u}}$ in Längsrichtung am Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s]

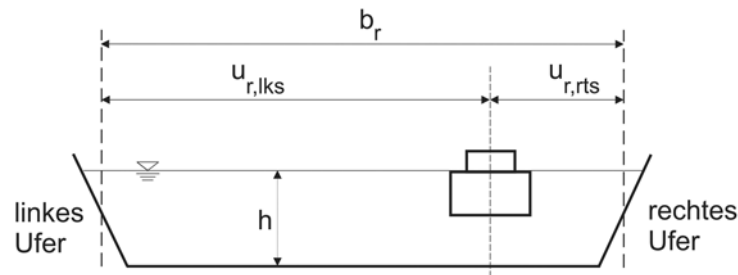


Bild 5.5 Skizze zu den rechnerischen Uferabständen und der rechnerischen Gewässerbreite

Abhängig vom Verhältnis der Schiffslänge zur rechnerischen Kanalbreite L / b_r können die Verhältnisswerte $\Delta \bar{h}_u / \Delta \bar{h}$ bzw. $\bar{v}_{\text{rück},u} / \bar{v}_{\text{rück}}$, gültig für das rechte Ufer, in Abhängigkeit vom rechnerischen rechten Uferabstand $u_{r,rts} / b_r$ (Definitionen s. Bild 5.5) näherungsweise (Schiff als umströmter Dipol) aus Bild 5.7 ermittelt werden (exakte Formulierung siehe **Anhang D**). Zur Anwendung für das linke Ufer muss Bild 5.7 spiegelbildlich interpretiert werden ($u_{r,rts}$ durch $u_{r,lks}$ ersetzen). Es unterscheidet wichtige Fälle von L / B . Typische Längen- zu Breitenverhältnisse L / B sind

Europaschiff ES:	8,4
Großmotorgüterschiff GMS:	9,7
2er Schubverband 2SV:	16,2
4er Schubverband 4SV:	8,1

Diese exakten Werte sind bei der Anwendung von Bild 5.6 und Bild 5.7 sinnvoll zu interpolieren.

Die für die genaueren Berechnungen im äquivalenten Kanalprofil in diesem Fall anzusetzende Böschungsneigung $m_{K,\text{äqui}}$ kann geringfügig gegenüber der des Original-Kanalprofils verändert sein. Sie ergibt sich folgendermaßen:

 rechnerische Böschungsneigung $m_{K,\text{äqui}}$ [-] im äquivalenten Kanalprofil

$$m_{K,\text{äqui}} \approx \frac{1}{2} \left(m_{lks} \frac{\Delta \bar{h}_{u,lks}}{\Delta \bar{h}} + m_{rts} \frac{\Delta \bar{h}_{u,rts}}{\Delta \bar{h}} \right) \quad (5-10)$$

mit

$m_{K,\text{äqui}}$ äquivalente Böschungsneigung [-] nur für die hydraulische Berechnung von mittlerem Absunk und zugehöriger Rückströmung (äquivalente Böschungsneigung = Kotangens des Böschungswinkels des äquivalenten Kanalprofils) sowie für v_{krit}

$m_{K,\text{äqui}}$ gilt nicht für die Berechnungen in Kap. 6 und 7

m_{lks} Böschungsneigung am linken Ufer [-]

m_{rts} Böschungsneigung am rechten Ufer [-]

$\frac{\Delta \bar{h}_{u,lks}}{\Delta \bar{h}}$ relativer Absunk am rechnerischen linken Ufer [-] nach Bild 5.7

$\frac{\Delta \bar{h}_{u,rts}}{\Delta \bar{h}}$ relativer Absunk am rechnerischen rechten Ufer [-] nach Bild 5.7

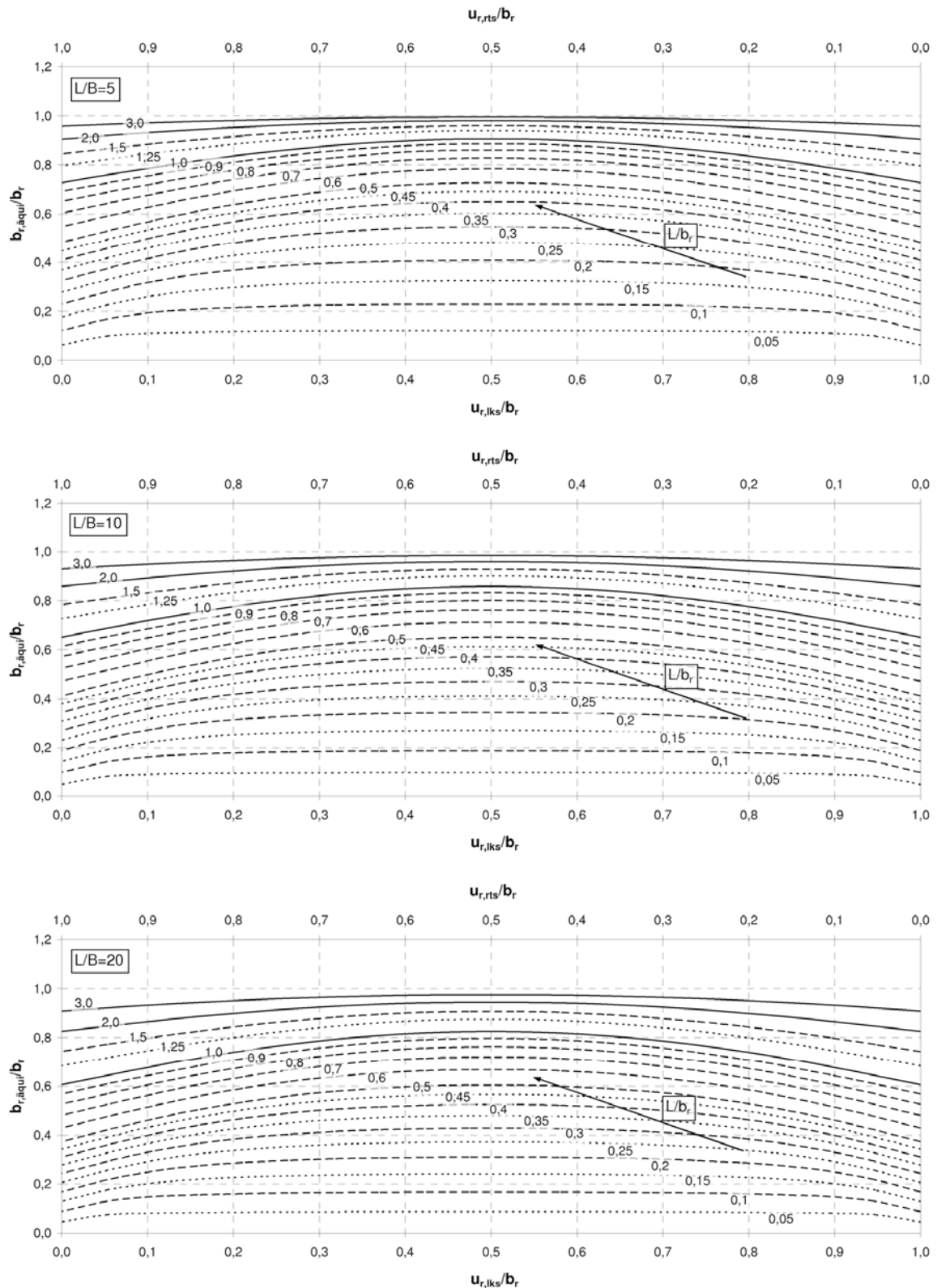


Bild 5.6 Rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils $b_{r,äqui}$ als Funktion von rechnerischer Kanalbreite b_r (Definition s. Bild 5.4 und Bild 5.5) und den rechnerischen Uferabständen $u_{r,rts}$ zum rechten bzw. $u_{r,lks}$ zum linken Ufer (Definition s. Bild 5.5) sowie von Schiffslänge L und Schiffsbreite B für die Fälle $L/B = 5, 10$ und 20 (für $f_B \neq 3$ in Gl. (5-7) ist L durch L_{eff} nach Gl. (5-8) zu ersetzen)

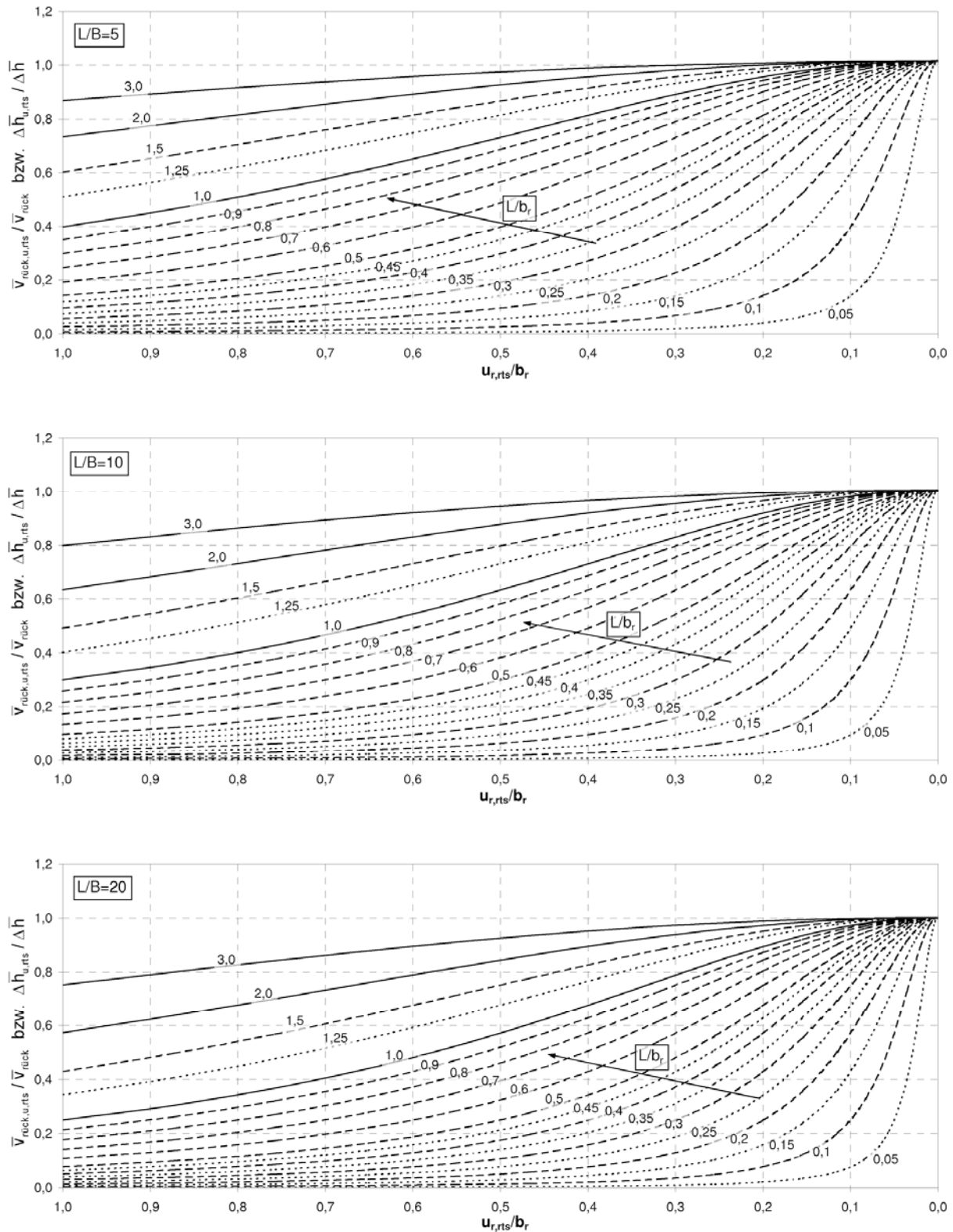


Bild 5.7 Mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit ($\bar{v}_{\text{rück,u,rts}}$) bzw. Absenk ($\Delta \bar{h}_{\text{u,rts}}$) am rechnerischen (Index r) rechten (Index rts) Ufer (Index u) in Relation zu den entsprechenden Werten am Schiff ($\bar{v}_{\text{rück}}, \Delta \bar{h}$), den Uferabständen $u_{\text{r,rts}}$ zum rechnerischen rechten und $u_{\text{r,lks}}$ zum rechnerischen linken Ufer (Definition s. Bild 5.5) sowie Schiffs-länge L und Schiffsbreite B für die Fälle $L/B = 5, 10$ und 20 .
Hinweis: Um die Werte am linken Ufer zu ermitteln, ist $u_{\text{r,rts}}$ durch $u_{\text{r,lks}}$ zu ersetzen (spiegelbildliche Anwendung)

Das rechnerische, d. h. das für die weitere Berechnung verwendete äquivalente Trapezprofil hat dann die Werte $A_{K,\text{äqui}}$, $m_{K,\text{äqui}}$ und h . Hieraus ergibt sich z. B. die äquivalente Wasserspiegelbreite $b_{WS,\text{äqui}}$ zu:

äquivalente Wasserspiegelbreite $b_{WS,\text{äqui}}$ [m]

$$b_{WS,\text{äqui}} = m_{K,\text{äqui}} h + A_{K,\text{äqui}} / h \quad (5-11)$$

mit

$A_{K,\text{äqui}}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m²] nach Gl. (5-9) in 5.5.1.1

Anmerkung: Werden beim Breitenfall A alle Flachwassereffekte – wie das Abklingen des Rückströmungs- und Absunkfeldes zum Ufer sowie die daraus resultierende Breite des äquivalenten Kanalquerschnittes – gemäß **Anhang D** umgesetzt, wie es in der zu GBB 2010 passenden Software GBBSoft /BAW 2008/ der Fall ist, sind die Breitenfälle B und C hiermit auch erfasst. Eine Ausnahme bildet der Ansatz für das Aufsteilen der Wellen bei einer exzentrischen Fahrt (s. 5.5.4.4). Hierfür muss explizit über den Breitenfall nach Bild 5.3 befunden werden.

Breitenfall B: „Flachwasser“ → kurze Schiffe, große Uferabstände

Für im Vergleich zur Kanalbreite kurze Fahrzeuglängen und für sehr große Uferabstände liegen Flachwasser- verhältnisse vor. Dieser Breitenfall tritt auf, wenn der kleinste Uferabstand $u_{r,\text{min}}$ gemäß Bild 5.4 folgendem Kriterium genügt:

$$u_{r,\text{min}} > \frac{b_E}{2} \quad (5-12)$$

mit

b_E Einflussbreite nach Gl. (5-7)

$u_{r,\text{min}}$ minimaler Uferabstand im rechnerischen Profil [m] (Definition s. Bild 5.4)

Die eindimensionale Kanaltheorie kann dann näherungsweise auf folgenden, in der Breite durch b_E begrenzten, äquivalenten Kanalquerschnitt $A_{K,\text{äqui}}$ angewendet werden:

$$A_{K,\text{äqui}} = b_E h \quad (5-13)$$

Für sehr große Uferabstände, d. h. für $u_{r,\text{min}} \gg b_E/2$, ist die Böschungsneigung des äquivalenten Kanalprofils $m_{K,\text{äqui}} \approx 0$. In diesem Fall klingen Rückströmungsgeschwindigkeit und Absunk bis zum Ufer (Abstand u_r) näherungsweise wie folgt ab:

$$\frac{\bar{v}_{\text{rück},u}}{\bar{v}_{\text{rück}}} = \frac{\Delta \bar{h}_u}{\Delta \bar{h}} \approx \frac{1}{1 + \left(\frac{u_r \pi}{b_E} \right)^2} \quad (5-14)$$

Für eine genauere Berechnung, insbesondere im Übergang des Breitenfalls B zu den Breitenfällen A und C, ist das wesentlich schwächere Abklingen des Rückströmungsfeldes zu berücksichtigen. In diesem Fall sollte wie folgt vorgegangen werden:

- $A_{K,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-9)
- $b_{r,\text{äqui}}$ nach Bild 5.6
- $m_{K,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-10)
- $b_{WS,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-11)
- Veränderung von $\Delta \bar{h}$ und $\bar{v}_{\text{rück}}$ zwischen Schiff und Ufer zu den neuen Werten $\Delta \bar{h}_u$ und $\bar{v}_{\text{rück},u}$ nach Bild 5.7

Breitenfall C: „Übergangssituation“ → Übergang zwischen Kanal- und Flachwasserfahrt

Im Übergangsbereich zwischen Kanal- und Flachwasserfahrt überlappt sich der Einflussbereich b_E mit dem schiffsnäheren Ufer. Der Übergangsbereich genügt somit folgendem Kriterium:

$$u_{r,\min} \leq \frac{b_E}{2} \leq u_{r,\max} \quad (5-15)$$

Das äquivalente Kanalprofil ergibt sich näherungsweise durch Abschneiden des unwirksamen Anteils der Einflussbreite b_E (s. Bild 5.3). Die zugehörige äquivalente Querschnittsfläche $A_{K,\text{äqui}}$ ergibt sich dabei zu:

$$A_{K,\text{äqui}} = \left(\frac{b_E}{2} + u_{r,\min} \right) h \quad (5-16)$$

Die zugehörige äquivalente Böschungsneigung beträgt $m_{K,\text{äqui}} \approx m / 2$.

Am schiffsnäheren Ufer ist in erster Näherung davon auszugehen, dass $\bar{v}_{\text{rück},u} = \bar{v}_{\text{rück}}$ und $\Delta \bar{h}_u = \Delta \bar{h}$ ist. Für eine genauere Berechnung wird auf die Gl.n (5-9), (5-10) und (5-11) sowie auf Bild 5.6 und Bild 5.7 verwiesen.

5.5.1.2 Grenzschichteinfluss

Die angesprochene Berücksichtigung von Grenzschichteffekten, mit denen näherungsweise die in der 1D-Kanaltheorie vernachlässigten Energieverluste am Schiffskörper erfasst werden können, erfolgt getrennt für Bug- und Heckbereich durch eine effektive Schiffsquerschnittsfläche $A_{S,\text{eff}}$ im Bereich des prismatischen Schiffskörpers (Hauptspant):

Bug (vernachlässigbare Grenzschichteffekte):

 effektive Schiffsquerschnittsfläche im Bugbereich $A_{S,\text{eff},B}$ [m²]

$$A_{S,\text{eff},B} = A_{S,B} = B_B T_B \gamma_B \quad (5-17)$$

mit

$A_{S,B}$ Schiffsquerschnittsfläche im Bugbereich [m²]

B_B Schiffsbreite im Bugbereich [m]

T_B Schiffstiefgang im Bugbereich [m]

γ_B Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Bugbereich [-], in der Regel $\gamma_B = 1,0$ (prismatisches Mittelschiff)
Beachte: nicht zu verwechseln mit der Völligkeit des Schiffsvolumens

Heck (größte Grenzschichtdicke):

 effektive Schiffsquerschnittsfläche im Heckbereich $A_{S,\text{eff},H}$ [m²]

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{S,\text{eff},H} = A_{S,H} + \delta_{1H} (B_m + 2 T_m) \\ A_{S,H} = T_H B_H \gamma_H \\ \delta_{1H} = 0,645 L_H \left(1,89 + 1,62 \log_{10} \frac{L_H}{K_{SS}} \right)^{-2,5} \end{array} \right. \quad (5-18)$$

mit

$A_{S,H}$ Schiffsquerschnittsfläche im Heckbereich bzw. an der Stelle der größten Verdrängung [m^2]

B_H Schiffsbreite im Heckbereich [m]

B_m mittlere Schiffsbreite zwischen Bug und Heck [m]

K_{SS} äquivalente Sandrauheit der Schiffshaut [m], $K_{SS} \approx 0,3 \cdot 10^{-3} - 0,5 \cdot 10^{-3} m$

L_H Entwicklungslänge der Grenzschicht zwischen Bug und Hauptspantende [m]

T_H Schiffstiefgang im Heckbereich [m]

T_m mittlerer Schiffstiefgang zwischen Bug und Heck [m]

γ_H Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Heckbereich [-], in der Regel $\gamma_H = 1,0$ (prismatisches Mittelschiff)

Beachte: nicht zu verwechseln mit der Völligkeit des Schiffsvolumens

δ_{1H} Verdrängungsdicke im Heckbereich [m],

Beachte: kann nicht größer werden als die Flottwassertiefe

Wenn das Fahrzeug keinen prismatischen Schiffskörper aufweist, wie dies häufig bei Schleppern der Fall ist, kann näherungsweise für $A_{S,eff}$ der Querschnitt mit der größten Verdrängung gewählt werden. Dort ist dann auch die Verdrängungsdicke zu ermitteln.

5.5.2 Kritische Schiffsgeschwindigkeit der Kanalfahrt

Schiffsumströmung und Wellenbildung unterliegen im seitlich und tiefenmäßig begrenzten Fahrwasser mit steigender Schiffsgeschwindigkeit typischen Veränderungen. Während im sogenannten "unterkritischen" Geschwindigkeitsgebiet das vom Schiff verdrängte Wasser im "strömenden" Zustand entgegen der Fahrtrichtung am Schiff vorbeigeführt wird, setzt mit dem Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeit der instationäre Aufbau des zum Umschlag in den Zustand "Schießen" erforderlichen kritischen Gefälles ein.

Die Analyse der Messergebnisse von Naturversuchen in einem Kanal (ca. Regeltrapezprofil nach /BMV 1994/) mit einem modernen Großmotorgüterschiff /BAW 2009/ legt nahe, bei der Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit die Grenzschicht um den Schiffsrumpf und Flachwassereffekte gemäß 5.5.1 über $A_{K,äqui}$ und $A_{S,eff}$ zu berücksichtigen. Der Einfluss der Exzentrizität auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit erwies sich bei den Versuchen /BAW 2009/, unter Berücksichtigung der instationären Fahrsituation bei Annäherung an das Ufer, nur für den Breitenfall C in 5.5.1.1, also bei ufernaher Fahrt eines im Vergleich zur Kanalbreite kurzen Schiffes, als signifikant. Er wird nachfolgend über die gegenüber dem Original-Kanalprofil reduzierte Kanalbreite berücksichtigt. Einen geringen Einfluss auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit hatte die Vertrimmung. Bei hecklastiger Vortrimmung und bei stark dynamischem hecklastigen Trimm wird die kritische Schiffsgeschwindigkeit tendenziell kleiner bzw. die Wellenhöhen werden tendenziell größer als bei nicht vertrimmten Schiffen. Danach gelten für den mittleren Wasserspiegelabsenk bei kritischer Schiffsgeschwindigkeit $\Delta \bar{h}_{krit}$ und für die kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} (Geschwindigkeit relativ zum Wasser) folgende Gleichungen (Bild 5.8):

kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} [m/s], zugehöriger mittlerer Wasserspiegelabsenk $\Delta \bar{h}_{krit}$ [m]

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{h}_{krit} = x_{krit} h_m \\ v_{krit} = y_{krit} \sqrt{g h_m} \end{array} \right\} \quad (5-19)$$

Die Berechnung von x_{krit} und y_{krit} erfolgt iterativ über folgende Hilfsfunktionen:

$$\beta = 1 - \frac{1}{n}$$

$$\tilde{f} = \frac{m h_m}{b_{ws}}$$

$$f = 1 - x_{\text{krit}} \tilde{f}$$

(Hier muss x_{krit} (s. u.) vorgegeben werden - Rücksprungadresse bei Iteration)

$$f^* = \frac{2}{f}(1 - 2f)$$

$$\tilde{r} = \frac{1 - f^*}{3}$$

$$\tilde{x}_{\text{krit}} = -2\tilde{r}^{1/2} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{\beta f^*}{2\tilde{r}^{3/2}} \right] \right\}$$

Beachte: Berechnungen in Bogenmaß

$$x_{\text{krit}} = \frac{\beta - \tilde{x}_{\text{krit}}}{f}$$

Beachte: Ab hier Rücksprung zur Berechnung von f , bis Ergebnis ausreichend stabil

$$y_{\text{krit}} = \left[\frac{2x_{\text{krit}}}{(\beta - x_{\text{krit}}f)^2 - 1} \right]^{1/2}$$

Die Hilfsfunktionen sind mit folgenden Kennwerten des Kanals und des Schiffes verbunden:

$A_{K,\text{äqui}}$ äquivalenter Kanalquerschnitt [m^2] nach Gl. (5-9) in 5.5.1.1

$A_{S,\text{eff}}$ effektiver Schiffsquerschnitt [m^2] unter Berücksichtigung von Grenzschichteffekten an Bug und Heck nach 5.5.1 und 5.5.4.6

b_{WS} Wasserspiegelbreite [m], $b_{\text{WS}} = b_{\text{WS},\text{äqui}}$ nach Gl. (5-11) in 5.5.1.1

h_m mittlere Wassertiefe [m], $h_m = A_{K,\text{äqui}} / b_{\text{WS},\text{äqui}}$

m Böschungsneigung [-], $m = m_{K,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-10) in 5.5.1.1

n Querschnittsverhältnis [-], $n = n_{\text{äqui}} = A_{K,\text{äqui}} / A_{S,\text{eff}}$ (äquivalentes Q.)

Bei der Iteration kann als erste Schätzung für x_{krit} die Lösung für ein Rechteckprofil wie folgt herangezogen werden:

$$x_{\text{krit}} = \beta + 2 \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos(-\beta) \right]$$

Beachte: Berechnungen im Bogenmaß

Die dimensionslosen Werte y_{krit} für die kritische Schiffsgeschwindigkeit und x_{krit} für den kritischen Absenk sind in erster Linie vom n -Verhältnis abhängig. Einen geringen Einfluss auf v_{krit} hat der Formparameter \tilde{f} , der die Form des Kanalprofils beschreibt (s. Bild 5.8). Für überschlägliche Berechnungen kann der Einfluss von \tilde{f} auf v_{krit} vernachlässigt werden. Für typische n -Verhältnisse ergibt sich dann v_{krit} aus Bild 5.8. Der Einfluss von \tilde{f} auf x_{krit} ist aus Bild 5.8 und Bild 5.11 ersichtlich, aus denen Näherungswerte ermittelt werden können.

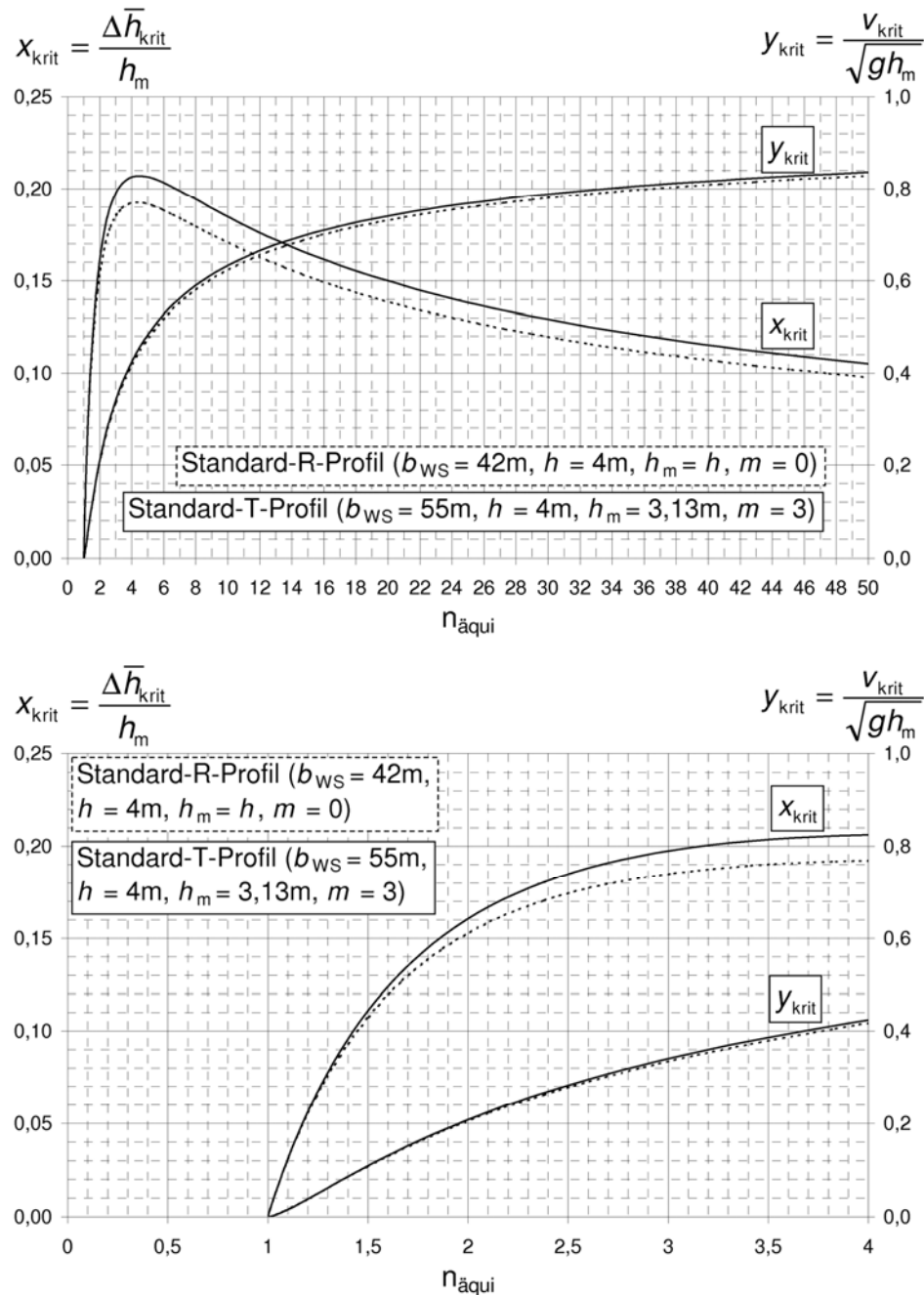


Bild 5.8 Abhängigkeit der kritischen Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} und des zugehörigen mittleren Absunks $\Delta \bar{h}_{krit}$ von n_{aqui} am Beispiel von Standard-T- und -R-Profil

Oberes Bild: $1 \leq n_{aqui} \leq 50$

Unteres Bild: $1 \leq n_{aqui} \leq 4$ (Detail aus oberem Bild)

In Sonderfällen, wie Gewässerquerschnitte mit stark ungleichförmiger Wassertiefe (z. B. Querschnitt mit Bermen oder Fahrrinnenbaggerungen), gelten für die kritische Geschwindigkeit veränderte Ansätze, die alternativ zu der angegebenen Näherungsgleichung (5-19) u. a. in /Römisch 1989/ nachzulesen sind.

Bei Fahrt mit Drift ist ein größerer effektiver Schiffsquerschnitt anzusetzen (s. 5.5.4.7).

5.5.3 Mittlerer Absunk und Rückströmungsgeschwindigkeit bei mittiger Kanalfahrt

Die eindimensionale Berechnung der bei stationärer Kanalfahrt eines Schiffes entstehenden Rückströmungsgeschwindigkeit und Wasserspiegelabsenkung beruht auf der BERNOULLIschen Gleichung (Energieerhaltung) und der Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung), angewendet auf den ungestörten Kanalquerschnitt vor dem Schiff und den durch den eingetauchten Hauptspantquerschnitt und die Wasserspiegelabsenkung eingegengten Querschnitt neben dem Schiff (s. Bild 5.9). Der Kanalquerschnitt strömt dabei auf das gedanklich "festgehaltene" Schiff mit der Schiffsgeschwindigkeit v_S (relativ zum Wasser) zu. In der Literatur wird die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser auch mit dem Symbol v_{sdw} bezeichnet, in der vorliegenden Schrift aber einheitlich nur als v_S verwendet. Vorausgesetzt werden die gleichmäßige Strömungsverteilung über den Querschnitt, die der mittleren Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt (Querschnitt mit der größten Wasserspiegelabsenkung) entsprechende Einsinktiefe des Schiffes (vereinfachende Annahme: Squat = Wasserspiegelabsenkung) und die Vernachlässigung von Energieverlusten. Weiterhin bleibt eine dynamische Vertrimmung des Schiffes unberücksichtigt. Mit Ausnahme von Fließquerschnitten mit großer Sohlenrauheit und hohen Turbulenzen aus einem aufgeprägten Strömungsfeld liefert die eindimensionale Kanaltheorie, trotz der genannten Vereinfachungen, zuverlässige Ergebnisse, wenn die nicht berücksichtigten Einflüsse durch empirische Korrekturen im Nachhinein erfasst werden.

Grenzschichteffekte am Schiff und Flachwassereffekte können zur Anwendung der 1D-Kanaltheorie näherungsweise mit den in 5.5.1 angegebenen Algorithmen durch eine äquivalente Kanalquerschnittsfläche $A_{K,\text{äqui}}$ und eine effektive Schiffsquerschnittsfläche $A_{S,\text{eff}}$ berücksichtigt werden. Der Einfluss einer Grundströmung auf die Absunkberechnung bei vorgegebenem $v_{SüG}$ wird durch Errechnung der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_S berücksichtigt:

Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_S[\text{m/s}]$

$$v_S = v_{SüG} \pm v_{Str}$$

(5-20)

(+: Bergfahrt, -: Talfahrt)

mit

v_{Str} mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s] im Querschnitt

$v_{SüG}$ Schiffsgeschwindigkeit über Grund [m/s]

Wird für Bemessungszwecke z. B. von $v_S = 0,97 v_{krit}$ ausgegangen, dann entspricht dies der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dann ohne Belang für die Absunkberechnung. Alle nachfolgend angegebenen Geschwindigkeiten sind danach relativ zum umgebenden Wasserkörper gemessen. Für die Bemessung der erforderlichen Steingröße ist die Grundströmung in Ufernähe erhöhend bzw. reduzierend zu berücksichtigen, siehe 5.5.4.6.

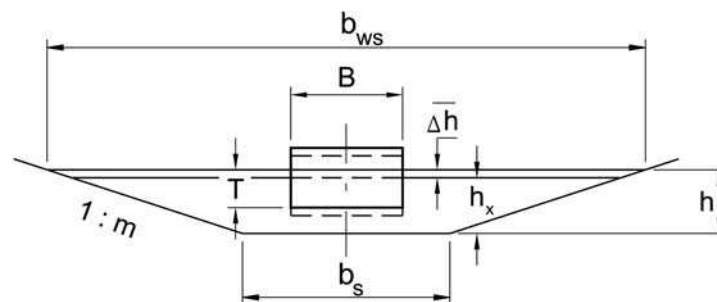


Bild 5.9 Definitionsskizze zur Berechnung der Verdrängungsströmung; Symbole z. T. s. Text sowie Gl.n (5-21) bis (5-23)

Es gelten dann die folgenden beiden Grundbeziehungen:

1. Aus der BERNOULLIschen Gleichung ergibt sich die über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung $\Delta \bar{h}$ im engsten Durchflussquerschnitt neben dem Schiff (s. Bild 5.9):

$$\Delta \bar{h} = h - h_x = \frac{1}{2g} \left[\alpha_1 (v_s + \bar{v}_{\text{rück}})^2 - v_s^2 \right] \quad (5-21)$$

2. Nach der Kontinuitätsgleichung

$$A v_s = \left[A - (A_M + b_m \Delta \bar{h}) \right] (v_s + \bar{v}_{\text{rück}}) \quad (5-22)$$

lautet die zugehörige querschnittsgemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit am Bug bzw. Heck:

Querschnittsgemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{rück}}$ [m/s]

$$\bar{v}_{\text{rück}} = \frac{A_M + b_m \Delta \bar{h}}{A - (A_M + b_m \Delta \bar{h})} v_s = \frac{\Delta A}{A - \Delta A} v_s \quad (5-23)$$

mit

A Kanalquerschnitt [m²], $A = A_{K,\text{äqui}}$ nach 5.5.1.1

A_M eingetauchter Hauptspantquerschnitt des Schiffes (unter Berücksichtigung von Grenzschicht- und Flachwassereffekten an Bug oder Heck) [m²], $A_M = A_{S,\text{eff}}$ nach 5.5.1.2 und 5.5.4.7

ΔA Querschnittsreduzierung im Kanal infolge Schiffsquerschnitt und Absenk [m²], $\Delta A = A_M + b_m \Delta \bar{h}$

b_m mittlere Wasserspiegelbreite im Bereich der Wasserspiegelabsenkung [m], $b_m = b_{WS} - \Delta \bar{h} m$

b_S Sohlenbreite [m]

b_{WS} Wasserspiegelbreite [m], $b_{WS} = b_{WS,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-11) in 5.5.1.1

g Erdbeschleunigung [m/s²]

h Kanalwassertiefe [m]

h_x Wassertiefe im engsten Durchflussquerschnitt [m]

$\Delta \bar{h}$ über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt [m]

m Böschungsneigung [-], $m = m_{K,\text{äqui}}$ nach Gl. (5-10) in 5.5.1.1

T Tauchtiefe am Hauptspant [m]

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s], nach Gl. (5-20)

$\bar{v}_{\text{rück}}$ mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s],
Hinweis: relativ zu einem mit v_{Str} bewegten Beobachter

α_1 Korrekturbeiwert [-] nach Gl. (5-25)

Aus Gl. (5-21) wird der implizite Berechnungsansatz für die Beziehung $\Delta \bar{h} = f(v_s)$ abgeleitet:

Zusammenhang von Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_s [m/s] und mittlerer Wasserspiegelabsenkung $\Delta \bar{h}$ [m]

$$v_s = \sqrt{\frac{2 g \Delta \bar{h}}{\alpha_1 \left(\frac{A}{A - \Delta A} \right)^2 - 1}} \quad (5-24)$$

mit

α_1 Korrekturbeiwert [-], nach Gl. (5-25)

Die Lösung dieses Berechnungsansatz erfolgt iterativ bei Vorgabe von $\Delta\bar{h}$ (übliche Größenordnung 0,2 - 0,5 m) solange, bis die Bemessungsschiffsgeschwindigkeit mit der berechneten übereinstimmt. Hierzu empfiehlt es sich, die errechnete Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_s als Funktion von $\Delta\bar{h}$ aufzutragen (s. Bild 5.10). $\bar{v}_{rück}$ ergibt sich danach aus Gl. (5-23).

Der in Gl.n (5-21) und (5-24) verwendete Korrekturbeiwert α_1 , der u. a. den Einfluss der Ungleichförmigkeit des Rückstromfeldes in Abhängigkeit von der Nähe der gefahrenen zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit beschreibt, wird von /Przedwojski et al. 1995/ angegeben:

$$\alpha_1 = 1,4 - 0,4 \frac{v_s}{v_{krit}} \quad (5-25)$$

Für kleine Verhältnisse von v_s/v_{krit} führt der Korrekturbeiwert α_1 dazu, dass ein Wasserspiegelabsenk $\Delta\bar{h}$ selbst bei sehr großen n -Verhältnissen und sogar beim theoretischen Sonderfall $n \rightarrow \infty$ (sehr flache Böschungen) auftritt, also dann, wenn eigentlich keine mittlere Rückströmung mehr vorliegt. Dies liegt an dem lokalen Schiffsumströmungsfeld, das auch im Tiefwasser ohne signifikante Verdrängungswirkung auftritt. Dieses lokale Strömungsfeld ist stark von der Schiffsförm abhängig und klingt vor allem mit dem Abstand vom Schiff schnell ab. Deshalb liegen Berechnungsergebnisse, die mit Gl. (5-25) in den Gl.n (5-21) und (5-24) erzielt werden, bei schlanken Schiffsförm, großen Uferabständen oder kleinen Schiffsgeschwindigkeiten z. T. weit auf der sicheren Seite.

Für überschlägliche Berechnungen kann auf die genaue Lösung der Gl. (5-24) verzichtet werden. Stattdessen kann mit v_s / v_{krit} , n -Verhältnis, Formparameter \tilde{f} und Bild 5.11 gearbeitet werden.

Die Werte der Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{rück}$ und des Absunks $\Delta\bar{h}$ sind zur Berücksichtigung ihres Abklingverhaltens zwischen Schiff und Ufer mit den in 5.5.1.1, Bild 5.7 dargestellten Verhältniswerten zu multiplizieren, um die entsprechenden Werte am Ufer $\bar{v}_{rück,u}$ und $\Delta\bar{h}_u$ zu erhalten:

$$\Delta\bar{h}_u = \Delta\bar{h} \left\{ \frac{\Delta\bar{h}_u}{\Delta\bar{h}} \right\} \quad \text{Bild 5.8} \quad (5-26)$$

$$\bar{v}_{rück,u} = \bar{v}_{rück} \left\{ \frac{\bar{v}_{rück,u}}{\bar{v}_{rück}} \right\} \quad \text{Bild 5.8} \quad (5-27)$$

$\Delta\bar{h}$ und $\bar{v}_{rück}$ sind Bemessungswerte für die mittige Fahrt und Eingangswerte für die weiteren empirischen Ergänzungen hinsichtlich des Einflusses des Wasserspiegelgefälles und der exzentrischen Fahrt nach 5.5.4.2 bis 5.5.4.4.

Für die eindimensionale Kanaltheorie sind zahlreiche weitere Berechnungsansätze entwickelt worden /Bouwmeester 1977/; /Dand, White 1978/; /Führböter et al. 1983/; /Jansen, Schijf 1953/; /Söhngen 1992/. Sie liefern alle nur einen über die Primärwelle gemittelten Wert für die Wasserspiegelabsenkung $\Delta\bar{h}$.

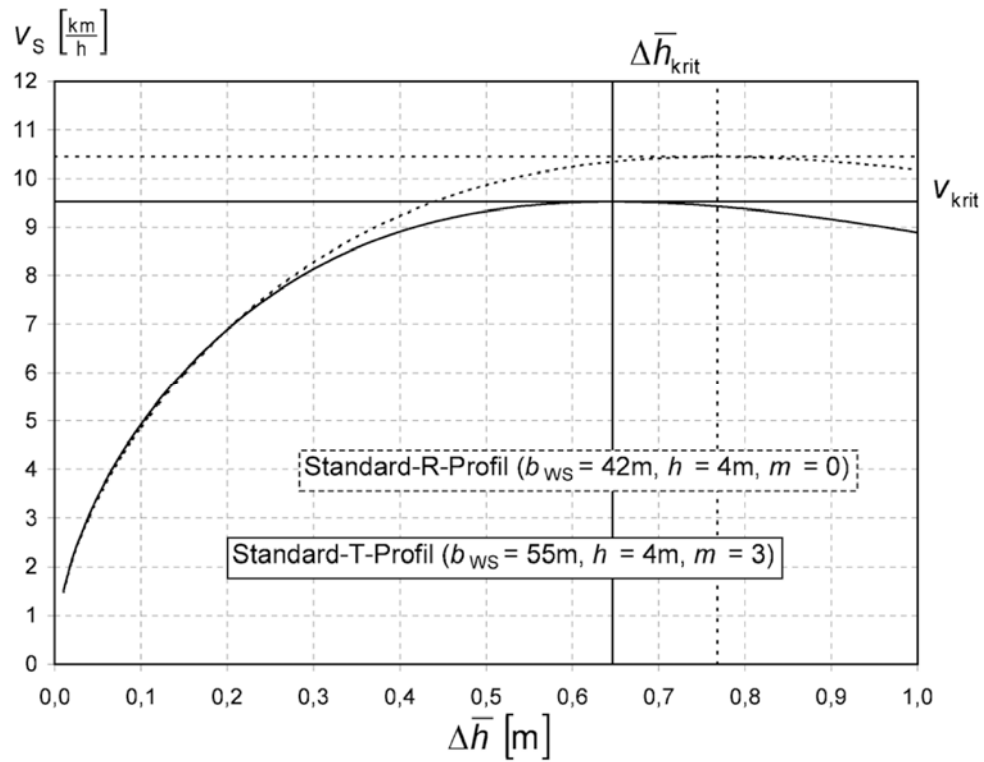


Bild 5.10 Mit Gl. (5-24) errechnete Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_s als Funktion des mittleren Wasserspiegelabsinks $\Delta\bar{h}$ nach der 1D-Kanaltheorie für die Fahrt eines GMS ($L = 110\text{ m}$, $B = 11,4\text{ m}$, $T = 2,8\text{ m}$, $\delta_{1H} = 0,19\text{ m}$) in Standard-T- und -R-Profil

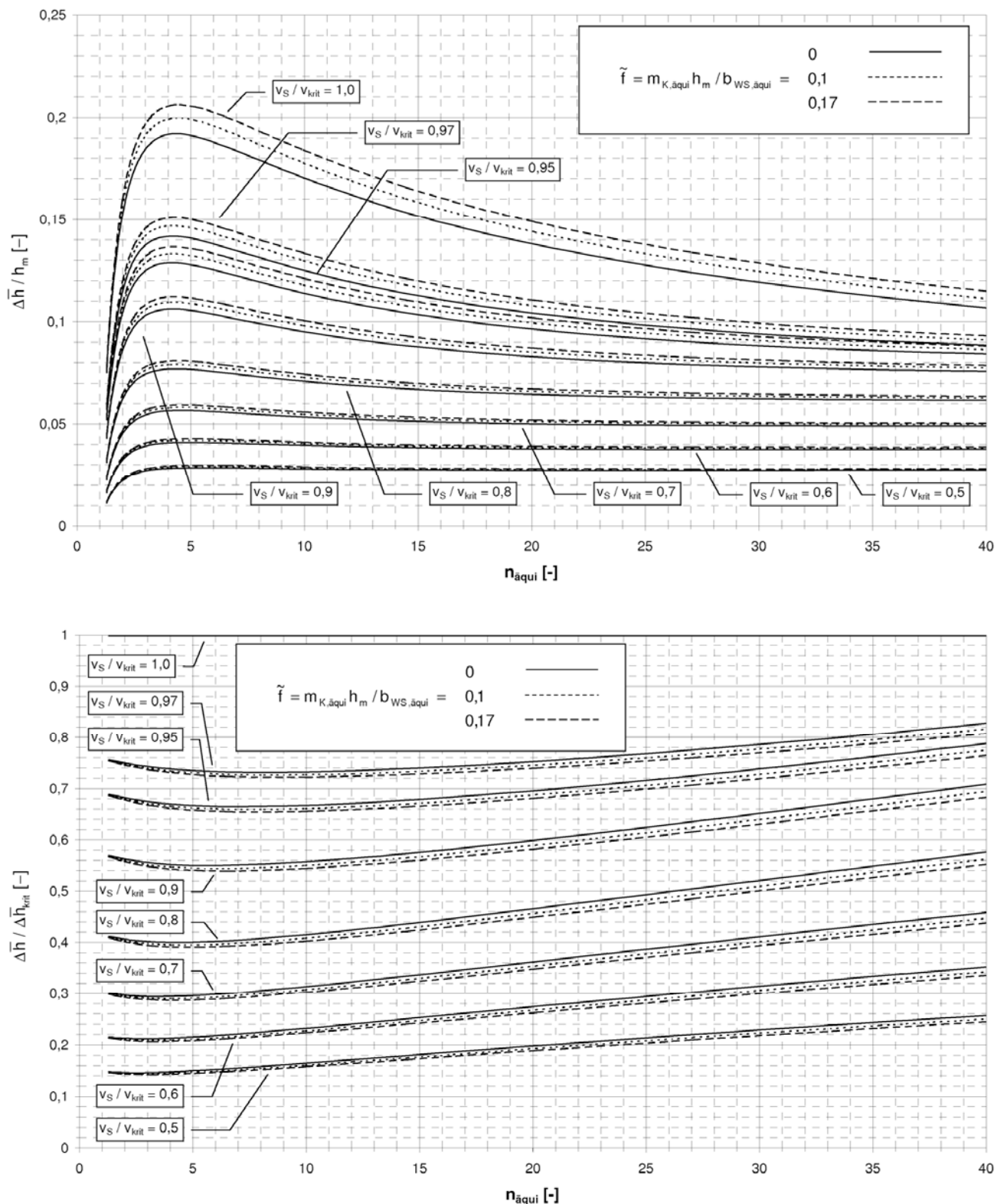


Bild 5.11 Mit der 1D - Kanaltheorie errechnete Relativwerte (bezogen auf $\Delta \bar{h}_{\text{krit}}$ und h_m) des mittleren Wasserspiegelabsinks $\Delta \bar{h}$ als Funktion von $n_{\text{äqui}}$ und des Formparameters \tilde{f} für typische relative Schiffsgeschwindigkeiten v_S / v_{krit} (Die Berechnungen erfolgten für die zentrische Fahrt eines 2,80 m tief abgeladenen GMS mit einem k_{SS} von 0,4 mm)

5.5.4 Hydraulische Bemessungsgrößen und geotechnisch maßgebende Absinkparameter bei beliebiger Fahrposition

5.5.4.1 Definition der Wellenhöhe

Die Berechnung der Bemessungswerte der Schiffswellenhöhe H für Bug (H_B) und Heck (H_H) erfolgt entsprechend der rechnerischen Kanalbreite in der Mitte der Böschung. Veränderungen der auf der Böschung auflaufenden Welle werden nicht separat, sondern global in den Bemessungsansätzen erfasst.

Prinzipielle Verläufe der Primär- und Sekundärwellen, wie ein ortsfester Beobachter sie am Ufer wahrnehmen würde, sind in Bild 5.12 dargestellt.

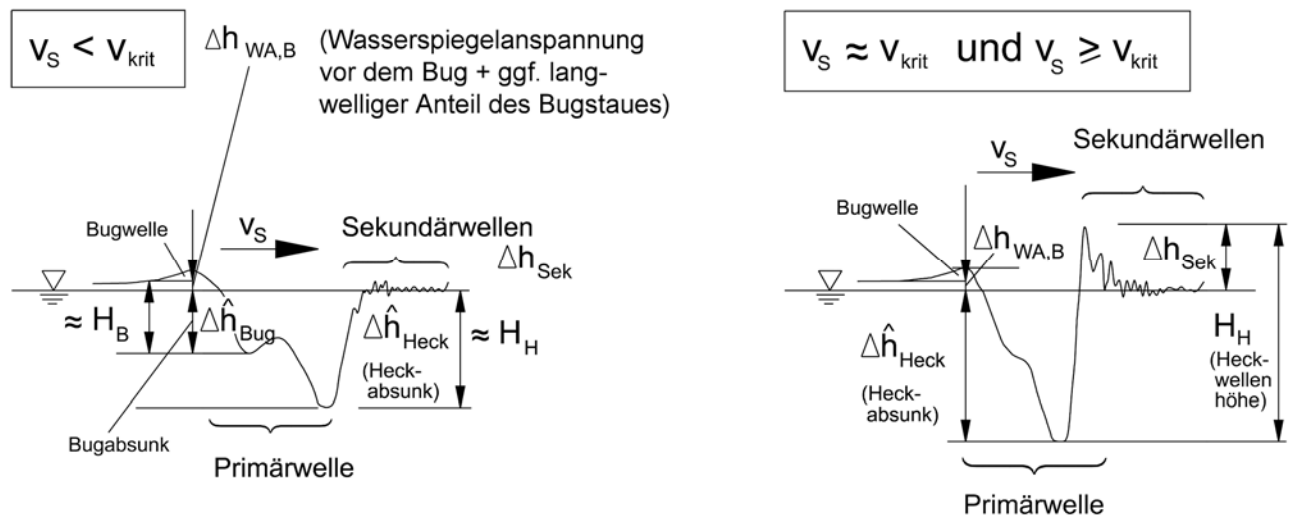


Bild 5.12 Schiffsprimärwellenbildung im unterkritischen ($v_s < v_{krit}$), kritischen ($v_s \approx v_{krit}$) und überkritischen ($v_s > v_{krit}$) Geschwindigkeitsbereich

5.5.4.2 Maximaler Wasserspiegelabsenk am Bug und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss

Zur Berechnung des maximalen Bugabsunks ist der Schiffsquerschnitt am Bug einzusetzen, ggf. unter Berücksichtigung von Grenzschicht- und Flachwassereffekten nach 5.5.1. Für moderne GMS und Schlepper gilt folgende Gleichung /Przedwojski et al. 1995/ für die Bugwellenhöhe am Ufer, wenn kein Exzentrizitätseinfluss vorliegt; die Gleichung berücksichtigt u. a. die Wasserspiegelanspannung $\Delta h_{WA,B}$ vor dem Bug:

maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug $\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ [m] ohne Exzentrizitätseinfluss

$$\Delta \hat{h}_{u,Bug} = F_1 \Delta \bar{h}_{u,Bug} \quad (5-28)$$

mit

F_1 Faktor zum maximalen Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug [-]

Standard: $F_1 = 1,1$

Sportboot $F_1 = 1,0$

Bemerkung: Bei fülligem Bug kann der Koeffizient auch größer als 1,1 sein.

$\Delta \hat{h}_{u,Bug}$ maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug [m]

$\Delta \bar{h}_{u,Bug}$ mittlerer Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug [m], errechnet für die Querschnittsverhältnisse am Bug nach 5.5.3

Der Einfluss der Exzentrizität auf die Bugwelle wird in 5.5.4.4 berücksichtigt.

Die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit im Bugbereich $\hat{v}_{\text{rück,u,Bug}}$ kann näherungsweise aus der Kontinuitätsgleichung Gl. (5-23) errechnet werden, wenn in dieser Gleichung $\Delta\bar{h}$ durch $\Delta\hat{h}_{\text{u,Bug}}$ ersetzt wird. Man beachte dabei, dass $\Delta\hat{h}_{\text{u,Bug}}$ sowohl b_m als auch ΔA beeinflusst.

5.5.4.3 Maximaler Wasserspiegelabsunk am Heck und zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit ohne Exzentrizitätseinfluss

Die Veränderung des maximalen Heckabsunks gegenüber $\Delta\bar{h}_u$ (s. Gl. (5-26)) ist von folgenden Einflüssen abhängig:

- (1) Verhältnis Tiefgang zu Wassertiefe (tendenziell größeres Verhältnis $\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}} / \Delta\bar{h}_{\text{u,Heck}}$ bei kleinerem T/h)
- (2) Antriebsart (tendenziell größeres $\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}}$ bei ufernaher Fahrt bei Zweischraubern als bei Einschraubern)
- (3) Nähe zu v_{krit} (wg. des zunehmend größeren Wasserspiegelgefälles zwischen Bug und Heck und des zugehörigen hecklastigen Trimms sowie der durch die Heckquerwelle ausgelösten Sekundärwellen nach 5.5.5)
- (4) Überlagerung mit Sekundärwellen vom Bug bei kurzen Schiffen bzw. großen Kanalbreiten (Abstandsfall B in 5.5.5.1)

Die Einflüsse (1) und (3) können näherungsweise mit folgender Gleichung berücksichtigt werden /Przedwojski et al. 1995/:

maximaler Wasserspiegelabsunk im Uferbereich am **Heck** $\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}}$ [m] ohne Exzentrizitätseinfluss

$$\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}} = C_H \Delta\bar{h}_{\text{u,Heck}} \quad (5-29)$$

mit

C_H Faktor für den Einfluss von Schiffstyp, Abladung, Vertrimmung und Wasserspiegellängsgefälle [-]

$C_H \approx 1,3$ für moderne Binnenschiffe ($T/h \approx 0,7$)

$C_H \approx 1,5$ für teilabgeladene, insbesondere ballastierte moderne Binnenschiffe und Schlepper ($T/h \approx 0,4$)

$C_H \approx 1,1$ für binnengängige Seeschiffe, da sie i. d. R. buglastig vertrimmen

$\Delta\bar{h}_{\text{u,Heck}}$ mittlerer Wasserspiegelabsunk im Uferbereich [m], errechnet nach 5.5.3 für die Querschnittsverhältnisse am Heck

$\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}}$ maximaler Wasserspiegelabsunk im Uferbereich am Heck [m]

Bei Schiffsgeschwindigkeiten im Bereich v_{krit} können zusätzliche Heckquerwellen auftreten, die in 5.5.5.3 beschrieben sind. Deren Anteil an $\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}}$ kann größer sein als der aus den o. g. Einflüssen (1) – (3), insbesondere im Falle des zusätzlichen Einflusses (4).

Alternativ zu Gl. (5-29) ergibt sich nach Messungen der BAW am Wesel-Datteln-Kanal /BAW 2009/ dann $\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}}$ aus folgender Gleichung:

$$\Delta\hat{h}_{\text{u,Heck}} \approx \Delta\bar{h} + \frac{1}{2} H_{\text{Sek,q}} \quad (5-30)$$

mit

$H_{\text{Sek,q}}$ Höhe der zusätzlichen Sekundärwelle nach 5.5.5.2 aus Gl. (5-61) unter Beachtung von Gl. (5-65)

Im Falle des Einflusses (4) ist der unterhalb des Ruhewasserspiegels (RWS) auftretende Anteil der Sekundärwellenhöhe des Bugs aus Gl. (5-56) (s. 5.5.5.2) zu $\Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}}$ nach Gl. (5-29) oder Gl. (5-30) zu addieren.

Die maximale Rückströmungsgeschwindigkeit im Heckbereich $\hat{v}_{\text{rück},u,\text{Heck}}$ kann näherungsweise aus der Kontinuitätsgleichung Gl. (5-23) errechnet werden, wenn in dieser Gleichung $\Delta\bar{h}$ durch $\Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}}$ ersetzt wird. Man beachte dabei, dass $\Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}}$ sowohl b_m als auch ΔA beeinflusst.

5.5.4.4 Maximalwerte von Bug- und Heckwellenhöhe bei exzentrischer Fahrt

Mit zunehmender Ufernähe des Schiffes steigen die Werte der Wellenhöhe an der Böschung stark an. Das hängt damit zusammen, dass mit abnehmendem Uferabstand immer kleinere Wellenlängen entstehen, zu denen bei konstanter Wellenenergie immer größere Wellenhöhen gehören. Der Anstieg der Wellenhöhe berechnet sich nach /Przedwojski et al. 1995/ in Abhängigkeit vom Verhältnis der Querschnittsfläche zwischen Schiff und Ufer zum Kanalquerschnitt (bei Flachwasserfahrt zur äquivalenten Kanalquerschnittsfläche nach 5.5.1.1) für das schiffsnähere Ufer wie folgt (s. Bild 5.13):

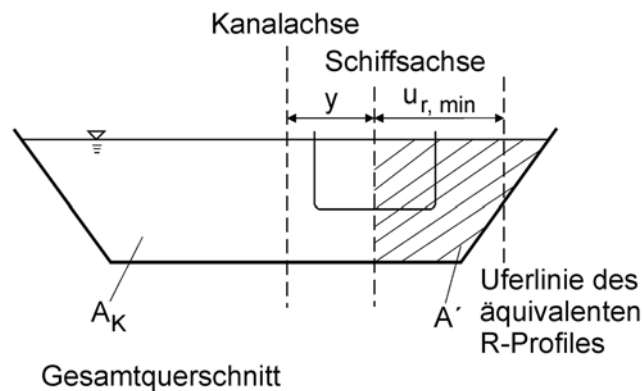


Bild 5.13 Definition von A' bei exzentrischer Fahrt im Breitenfall A nach 5.5.1.1

Maximalwert der Bugwellenhöhe $H_{u,\text{Bug}}$ [m] am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt

$$H_{u,\text{Bug}} = \left(2,0 - 2 \frac{A'}{A}\right) \Delta\hat{h}_{u,\text{Bug}} \quad (5-31)$$

Maximalwert der Heckwellenhöhe $H_{u,\text{Heck}}$ [m] am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt

$$H_{u,\text{Heck}} = \left(2,0 - 2 \frac{A'}{A}\right) \Delta\hat{h}_{u,\text{Heck}} \quad (5-32)$$

mit

A maßgebende Querschnittsfläche des Kanals [m²]

A' Querschnittsfläche zwischen Schiffsachse und Ufer [m²] (s. Bild 5.13)

A'/A Querschnittsverhältnis [-] entsprechend den Fallunterscheidungen in 5.5.1.1 und Bild 5.3

Für die Bestimmung von A'/A werden – je nach Breitenfall – folgende Formeln empfohlen:

$$\text{Breitenfall A: } \frac{A'}{A} = \frac{u_{r,\min}}{b_r} \geq 0 \quad (5-33)$$

$$\text{Breitenfall B: } \frac{A'}{A} = 0,5 \quad (5-34)$$

$$\text{Breitenfall C: } \frac{A'}{A} = \frac{u_{r,\min}}{\frac{b_E}{2} + u_{r,\min}} \geq 0 \quad (5-35)$$

$\Delta \hat{h}_{u,\text{Bug}}$ maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Bug [m] nach 5.5.4.2

$\Delta \hat{h}_{u,\text{Heck}}$ maximaler Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Heck [m] nach 5.5.4.3

Die o. g. Bestimmungsgleichungen für A'/A kommen mit Annahme von $u_{r,\min}$ und b_E ohne direkte Interpretation der Querprofile aus. Alternativ zu diesen Bestimmungsgleichungen könnten A' und A auch aus dem äquivalenten Kanalprofil errechnet werden. Hierfür müsste allerdings über die zu diesem Profil gehörende Exzentrizität befunden werden, die von der im Originalprofil abweichen kann und für die hier keine Bestimmungsgleichungen angegeben sind. Deshalb werden auch in GBBSoft die o. g. Gleichungen umgesetzt. Hierfür ist nur der Breitenfall nach Bild 5.3 zu identifizieren, auch wenn $b_{r,\text{äqui}}$ mit den genaueren Verfahren im Breitenfall A bestimmt wird.

Bei extrem ufernaher Fahrt kann der Auftreffpunkt der Interferenzschrägwellen des Bugsekundärwellensystems mit dem Maximum des Heckabsunks zusammenfallen. Zur Heckwellenhöhe nach Gl. (5-53), die für die Steingrößensbemessung verwendet wird (nicht für die geotechnische Bemessung), ist dann näherungsweise die halbe Sekundärwellenhöhe H_{Sek} gemäß Gl. (5-56) zu addieren (Sondersituation von Abstandsfall B in 5.5.5.1).

Am schiffsferneren Ufer kann für Bemessungszwecke $H_{u,\text{Bug}} = \Delta \hat{h}_{u,\text{Bug}}$ und $H_{u,\text{Heck}} = \Delta \hat{h}_{u,\text{Heck}}$ gesetzt werden.

Der Einfluss der Ufernähe auf die Rückströmungsgeschwindigkeit ist gering und wird vernachlässigt. Die Bemessungswerte ergeben sich somit direkt nach 5.5.4.2 und 5.5.4.3

5.5.4.5 Wiederauffüllungsströmung

In brechenden Heckwellen, aber auch bei ungebrochenen hohen Heckwellen sowie bei ufernaher Fahrt tritt eine uferparallele Wiederauffüllungsströmung an der Böschung auf. Sie ist als mitlaufende schäumende Zunge am Ufer erkennbar (Bild 5.14).

Die Fließgeschwindigkeit u_{\max} , die in Höhe der Deckwerkssteine relativ zum fahrenden Schiff, ohne Berücksichtigung einer natürlichen, ufernahen Strömungsgeschwindigkeit, auftritt, erreicht bei sehr großen Wellenhöhen bzw. bei brechenden Wellen die Schiffsgeschwindigkeit zuzüglich turbulenter Fluktuationen. Für kleinere Wellenhöhen ist sie maßgeblich vom Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur Wellenfortschrittsgeschwindigkeit der brechenden Welle (errechnet mit Wassertiefe \approx Wellenhöhe) abhängig (Kennzahl \tilde{Fr}). Aus Messdaten der BAW am Wesel-Datteln-Kanal /BAW 2009/ konnte folgende Näherungsgleichung für u_{\max} abgeleitet werden:

maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung u_{\max} [m/s]

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\max} \approx 0,3 v_s \quad \text{für } \tilde{Fr}^2 > 1,83 \\ u_{\max} \approx 0,3 v_s + 0,7 \left(1 - \frac{\tilde{Fr}^2 - 0,71}{1,12} \right) v_s \quad \text{für } 0,71 \leq \tilde{Fr}^2 \leq 1,83 \\ u_{\max} \approx 1,0 v_s \quad \text{für } \tilde{Fr}^2 < 0,71 \end{array} \right. \quad (5-36)$$



Bild 5.14 Wiederauffüllungsströmung an der Böschung bei ufernaher Fahrt eines abgeladenen (oben) und leeren (Mitte) Großmotorgüterschiffes sowie eines Schleppers (unten) im Standard-T-Profil

mit

\tilde{Fr} Froude-Zahl [-], gebildet mit der maximalen Heckwellenhöhe anstelle der Wassertiefe

$$\tilde{Fr} = \sqrt{\frac{v_s^2}{g \cdot H_{u,Heck}}} \quad (5-37)$$

$H_{u,Heck}$ maximale Heckwellenhöhe [m] nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) (Bemessungswellenhöhe)

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

u_{max} maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Höhe der Deckwerksteine [m/s]

Ein Ansatz, der die Rauheit der Böschungssicherung berücksichtigt, ist von /Verhey, Bogaerts 1989/, angegeben worden.

Neben der Kennzahl \tilde{Fr} sind die örtliche Froude-Zahl und das Verhältnis der Wellenhöhe $H_{u,Heck}$ zum Uferabstand u_{eff} bestimmend dafür, ob eine signifikante Wiederauffüllungsströmung auftritt oder nicht. Aus Fahrversuchen im WDK /BAW 2009/ können die im Bild 5.15 angegebenen Bereiche unterschieden werden (Brecherkriterium). Zur Bildung der Froude-Zahl sind dabei die Maximalwerte der Rückströmungsgeschwindigkeit und der Wellenhöhe am Heck nach 5.5.4.3 und 5.5.4.4 einzusetzen.

Die o. g. Gl. (5-36) und das Brecherkriterium gemäß Bild 5.15 gelten nach vorliegenden Erfahrungen nur für Kanäle mit typischen Querschnittsverhältnissen n von etwa 5 bis 10. Für große n -Verhältnisse und große Uferabstände wird u_{max} mit Gl. (5-36) i. d. R. überschätzt. Dies gilt vor allem für kleine Schiffsgeschwindigkeiten, bei denen der untere Grenzwert $0,3 v_s$ maßgebend wird, denn der Faktor 0,3 nimmt streng genommen mit größeren n ab.

Neue Untersuchungen zeigen, dass u_{max} für Bemessungszwecke nur dann herangezogen werden sollte, wenn das Brecherkriterium erfüllt ist, denn nur brechende Wellen erzeugen starke Erosionswirkungen auf die Wasserbausteine. Ein hierauf basierender Berechnungsansatz ist von /Söhngen et al. 2010/ entwickelt worden. Er wird insbesondere für große Uferabstände empfohlen, für die Gl. (5-36) tendenziell zu große Werte ergibt.

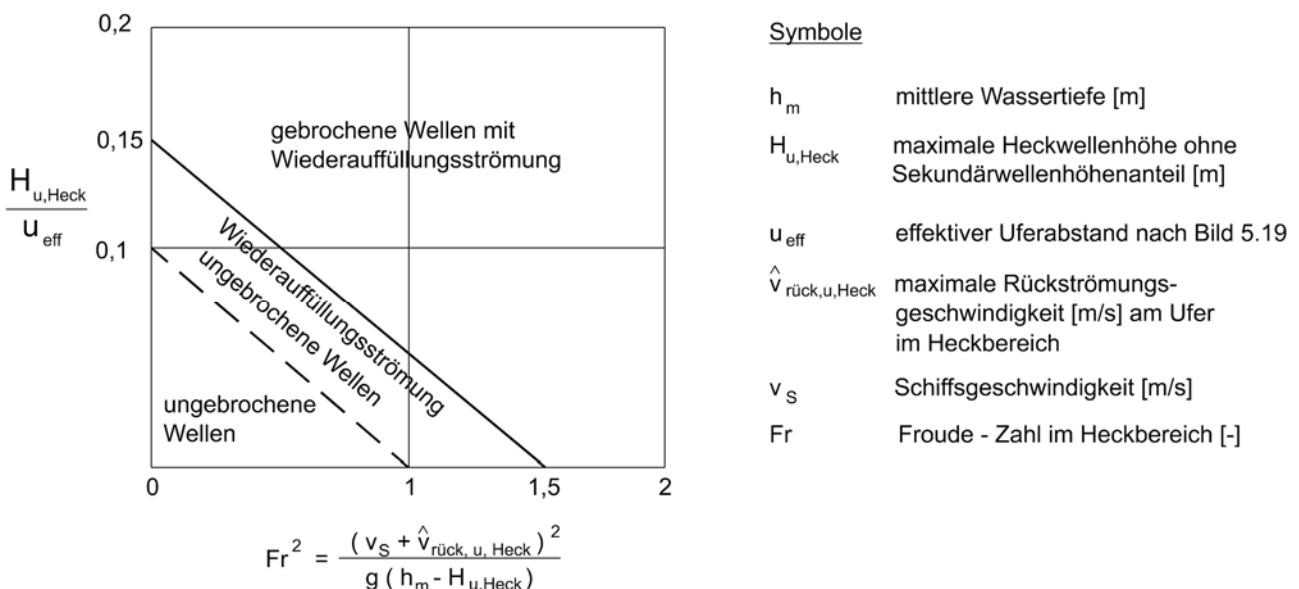


Bild 5.15 Abgrenzung zwischen ungebrochenen Wellen, Wellen mit signifikanter Wiederauffüllungsströmung und vollständig gebrochenen Wellen bei der ufernahen Fahrt an Böschungen (Brecherkriterium)

5.5.4.6 Ermittlung der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeiten in Ufernähe bei Grundströmung

Die in 5.5.3 und 5.5.4.5 angegebenen Gleichungen verwenden die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_{sdw} für Berechnungen der schiffsinduzierten, böschungsparellen Strömungen. Befindet sich das Binnenschiff in einem Gewässer mit einer Grundströmung, bedeutet das, dass die berechnete Strömungsgeschwindigkeiten als relativ zu einem mit v_{str} bewegten Beobachter betrachtet werden müssen. Um die zugehörigen Werte relativ zum Ufer zu ermitteln, die für die Bemessung der Steingröße relevant sind, muss der Einfluss der Grundströmung im Nachhinein berücksichtigt werden. Entsprechend der unterschiedlichen Fließrichtungen der Rückströmungs- und Wiederauffüllungsströmung und der Fahrtrichtungen Berg und Tal kann die Grundströmung im jeweiligen Fall reduzierend oder erhöhend wirken.

Für die Fließgeschwindigkeit muß hierbei ein ufernaher Wert $v_{str,Ufer}$ angesetzt werden, denn das Deckwerk liegt ja im Uferbereich. Dieser ist kleiner als die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. Falls keine Daten aus Messungen vorliegen, kann bei Annahme der Fließgeschwindigkeitsverteilung nach Gauckler-Manning-Strickler folgende Näherung für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ohne Schifffahrtseinfluss in Böschungsnähe getroffen werden:

$$v_{str,Ufer} \approx v_{str} \left(\frac{k_{str,u}}{k_{str}} \right) \left(\frac{\delta_v}{h} \right)^{2/3} \quad (5-38)$$

mit

h Wassertiefe [m] im Trapezprofil

$k_{str,u}$ Stricklerauheit [$m^{1/3}/s$] des Ufers, d.h. des Deckwerks ($\sim 30 m^{1/3}/s$)

k_{str} mittlere Stricklerauheit [$m^{1/3}/s$] des Querprofils (aus hydraulischer Berechnung)

v_{str} mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s] im Querschnitt

δ_v Grenzschichtdicke [m] des Rückströmungsfeldes (Schätzwert $\approx 1 m$)

Für die maximale Strömungsgeschwindigkeit v_{max} in Ufernähe aus **Rückströmung** und Fließgeschwindigkeit, wie sie in Gl. (6-10) zur Steingrößenbemessung einzusetzen ist, ergibt sich dann:

bei Fließgeschwindigkeit in Fahrtrichtung (Talfahrt):

$$v_{max} = \hat{v}_{rück} - v_{str,Ufer} \quad (5-39)$$

bei Fließgeschwindigkeit entgegen Fahrtrichtung (Bergfahrt):

$$v_{max} = \hat{v}_{rück} + v_{str,Ufer} \quad (5-40)$$

mit

v_{max} maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s] aus Rückströmung und Fließgeschwindigkeit $v_{str,Ufer}$ in Ufernähe (im Abstand der Grenzschichtdicke des Rückströmungsfeldes)

$\hat{v}_{rück}$ maximale Rückströmungsgeschwindigkeit [m/s]

$\hat{v}_{rück} = \hat{v}_{rück,u,Bug}$ für den Bugbereich nach 5.5.4.2

$\hat{v}_{rück} = \hat{v}_{rück,u,Heck}$ für den Heckbereich nach 5.5.4.3

$v_{str,Ufer}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s] ohne Schifffahrtseinfluss in Böschungsnähe nach Gl. (5-38)

Für die Böschungsbelastung durch die **Wiederauffüllungsströmung** gelten dieselben Überlegungen wie für die Rückströmungsgeschwindigkeit. Hier verhält sich die Wirkung der Grundströmung jedoch genau gegenläufig zu der der Rückströmung. Dadurch dass die Wiederauffüllungsströmung in Fahrtrichtung mit dem Schiff läuft, erhöht sich bei einer Talfahrt, bei der das Schiff in Fließrichtung fährt, die Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung um die am Ufer vorhandene Grundströmung. Damit ergibt sich die in Gl. (6-11) einzusetzende Bemessungsgeschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung $u_{max,B}$ zu:

bei Fließgeschwindigkeit in Fahrtrichtung (Talfahrt):

$$u_{\max,B} = u_{\max} + v_{\text{Str,Ufer}} \quad (5-41)$$

bei Fließgeschwindigkeit entgegen Fahrtrichtung (Bergfahrt):

$$u_{\max,B} = u_{\max} - v_{\text{Str,Ufer}} \quad (5-42)$$

mit

$u_{\max,B}$ Bemessungsgeschwindigkeit in der Wiederauffüllungsströmung [m/s]

u_{\max} maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung nach 5.5.4.5

$v_{\text{Str,Ufer}}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s] ohne Schifffahrtseinfluss in Böschungsnähe nach Gl. (5-38)

5.5.4.7 Vergrößerung der Wellenhöhen bei Fahrt mit Driftwinkel

Schon bei Fahrt auf **gerader Strecke** kann aufgrund der Schlängelbewegung des Schiffs temporär ein Driftwinkel β_D zwischen Schiffs- und Kanalachse auftreten, der nach /BMV 1994/ mit ca. $2,1^\circ$ (GMS) bzw. ca. $1,25^\circ$ (185 m SV) anzusetzen ist (s. Bild 5.16).

Bei **Kurvenfahrten** ist der Driftwinkel β_D , insbesondere bei älteren Schiffen und bei Fahrt ohne Bugruderein-satz, wesentlich größer (s. Bild 5.16b). Er kann gemäß Bild 5.16b aus der relativen Lage des taktischen Dreh-punktes (c_F - Wert: fahrdynamische Konstante) errechnet werden. Im Stillwasser werden für fahrdynamische Bemessungsaufgaben von /Dettmann 1998/ $c_F \approx 0,9$ für SV und $c_F \approx 1,0$ für GMS empfohlen. Die niederländi-schen Richtlinien /RVW 2009/ empfehlen für voll abgeladene Schiffe Werte von $c_F \approx 0,7$ und für Leerfahrer von $c_F \approx 1,0$. Zur Berücksichtigung des Strömungseinflusses wird auf /Dettmann, Jurisch 2001/ bzw. /Söhngen, Tittizer 2009/ verwiesen.

Dieser Driftwinkleinfluss wird durch die Definition des "fiktiv" vergrößerten eingetauchten Hauptspantquer-schnitts $A_{S,\text{eff},D}$ berücksichtigt (Grenzschichteffekte werden vernachlässigt):

Schiffsquerschnitt $A_{S,\text{eff},D}$ bei Fahrt mit Drift [m²]

$$A_{S,\text{eff},D} = \frac{(B + 0,25 L \sin \beta_D)}{B} A_M \quad (5-43)$$

mit

A_M eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Hauptspant [m²] (Grenzschicht hier vernachlässigt)

B Schiffsbreite [m]

L Schiffslänge [m]

β_D Driftwinkel [°]

Die Veränderung der Böschungsbelastung bei Fahrt mit Driftwinkel wird über $A_{S,\text{eff},D}$ (anstelle $A_{S,\text{eff}}$ nach 5.5.1.2) und die ggf. größere Schiffsexzentrizität (maßgebend für die Steingrößenbemessung ist in der Regel die Lage des Schiffshecks, genauer die Lage des Hauptspants im Bereich des Schiffshecks) in die Dimensionierung ein-geführt (wg. $A_{S,\text{eff},D} > A_M$). Der Einfluss des Driftwinkels auf die hydraulischen Bemessungsgrößen ist bei Einzel-fahrern gering und erst bei langen Schubverbänden relevant. Da nicht von vornherein entschieden werden kann, ob die Fahrt mit oder ohne Drift bemessungsrelevant ist, müssen ggf. beide Fälle untersucht werden.

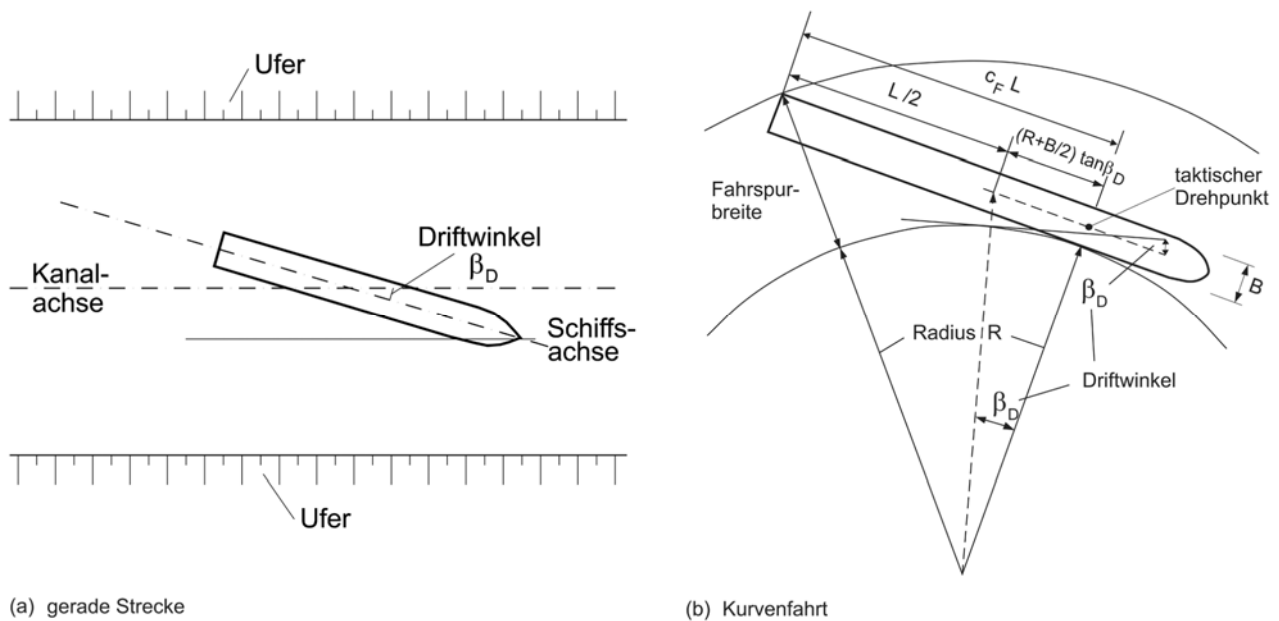


Bild 5.16 Prinzipskizze zur Erfassung des Driftwinkelverhaltens auf gerader Strecke (a) und bei Kurvenfahrt (b)

Da die in GBBSOft angebotenen Berechnungsverfahren nur von einer parallelen Lage des Schiffes zum Ufer ausgehen, müssen ggf. mehrere Schiffspositionen untersucht werden (s. Bild 5.17). Dies liegt daran, dass sich die Schiffspositionen auf die verschiedenen Bemessungszielgrößen unterschiedlich auswirken:

- Für die Bemessung der Steingröße aus Wiederauffüllungsströmung sollte – wie oben schon angemerkt – die Exzentrizität der Schiffsposition im Querprofil entsprechend der Position des Hauptspantendes am Heck (i. d. R. identisch mit der Position der hintersten Schiffseiche, in etwa L_H vom Bug entfernt) gewählt werden.
- Für die geotechnische Bemessung kann dagegen auch die ufernähere Position des Schiffsbugs bzw. besser des Hauptspantanfangs (i. d. R. Lage der ersten Eiche, ungefähr L_B vom Bug entfernt) im Bugbereich maßgebend werden. Entsprechend diesem kleineren Abstand vom Ufer ist eine größere Exzentrizität des Schiffspfadendes von der Achse anzusetzen. Um dabei zu vermeiden, dass das Heck die Absinkzeit bestimmt – was rechnerisch bei ballastierten Schiffen der Fall sein kann –, sollte der Hecktiefgang rechnerisch verkleinert werden.
- Sollte die Rückströmungsgeschwindigkeit bemessungsrelevant sein, kann sowohl der Bug (weil er näher am Ufer liegt) als auch das Heck (weil es z. B. ballastiert ist) zu größeren Bemessungswerten führen.

Um alle o. g. Sonderfälle abzudecken, wird empfohlen, bei Fahrt mit signifikantem Driftwinkel alle drei im Folgenden beschriebenen Fahrsituationen zu unterscheiden. Für einfache, praxisnahe Berechnungen reicht die Betrachtung der mittigen Schiffsposition aus.

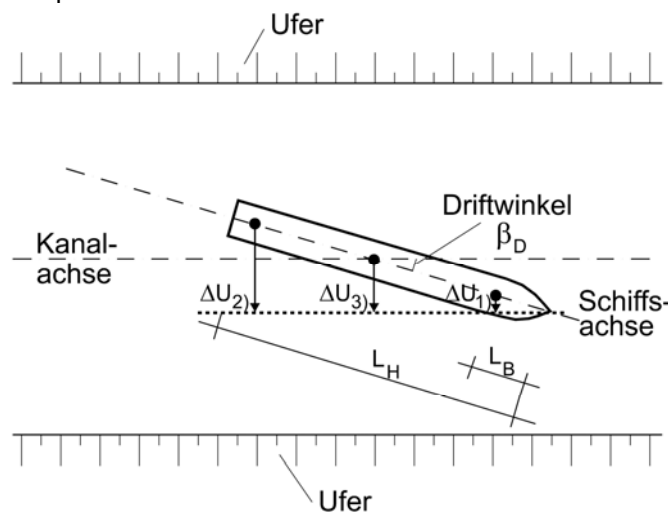


Bild 5.17 Prinzipskizze der für die Bemessung bei Fahrt mit signifikantem Driftwinkel empfohlenen drei Fahrsituationen

1. Ufernahe Schiffposition (wenn das Innenufer der Kurve das Bemessungsufer ist!)

Die ufernahe Position entspricht der Lage des Hauptspantanfangs im Bereich des Schiffsbugs. Für die Steingrößenbemessung aus Rückströmung am Bug und die geotechnische Bemessung aus Absunkzeit und Absunk am Bug wird ein rechnerisch reduzierter Hecktiefgang angesetzt. Ist die Bugposition, z. B. aus einer Trassierung, unter Verwendung rechteckiger Schiffssymbole bekannt, wird die zusätzliche Entfernung des Hauptspants vom Ufer wie folgt berechnet:

$$\Delta u = L_B \sin \beta_D \quad (5-44)$$

mit

Δu zusätzlicher Uferabstand in Bezug zum Uferabstand am Schiffsbug (s. Bild 5.17)

L_B Abstand des Bugs vom Hauptspantanfang

$L_B \approx 0,1 - 0,2$ Schiffslängen

β_D Driftwinkel [°]

2. Uferferne Schiffposition (wenn das Innenufer der Kurve das Bemessungsufer ist!)

Die uferferne Position entspricht der Lage des Hauptspantendes im Bereich des Schiffshecks. Sie ist maßgebend für die Steingrößenbemessung aus Rückströmung, Wiederauffüllungsströmung und Wellenhöhe am Heck. Ist wieder die Bugposition bekannt, liegt der Hauptspant zusätzlich wie folgt vom Ufer entfernt:

$$\Delta u = L_H \sin \beta_D \quad (5-45)$$

mit

L_H Abstand des Bugs vom Hauptspantende

3. Schiffsmittige Position

Als erste Näherung für alle Bemessungsgrößen bei unmodifizierten Tiefgängen kann die Position der Schiffsmitte vom Ufer herangezogen werden. Der zugehörige Uferabstand in Bezug auf den Schiffsbug beträgt:

$$\Delta u = \frac{(L_H + L_B)}{2} \sin \beta_D \quad (5-46)$$

mit

$(L_H + L_B)/2$ Abstand des Bugs von der Schiffsmitte (sind L_H und L_B nicht bekannt, kann hier näherungsweise von $L/2$ ausgegangen werden)

5.5.4.8 Absunk von Schiffswellen

Das passierende Schiff bewirkt durch die lokal und temporär geänderten Querschnittsverhältnisse eine Umströmung mit Bugstau, Absunk und Heckwelle. Für geotechnische Fragestellungen (s. 7.1) ist die Kenntnis der größten Wasserspiegelabsunkwerte $z_{a,B}$ bzw. $z_{a,H}$ am Ufer (ausgehend vom aktuellen durch das Schiff angespannten Wasserspiegel vor dem Schiff ohne Bugwellenhöhe inf. Bugstau), der zugehörigen Absunkzeit t_a und damit der Absunkgeschwindigkeit \bar{v}_{za} erforderlich.

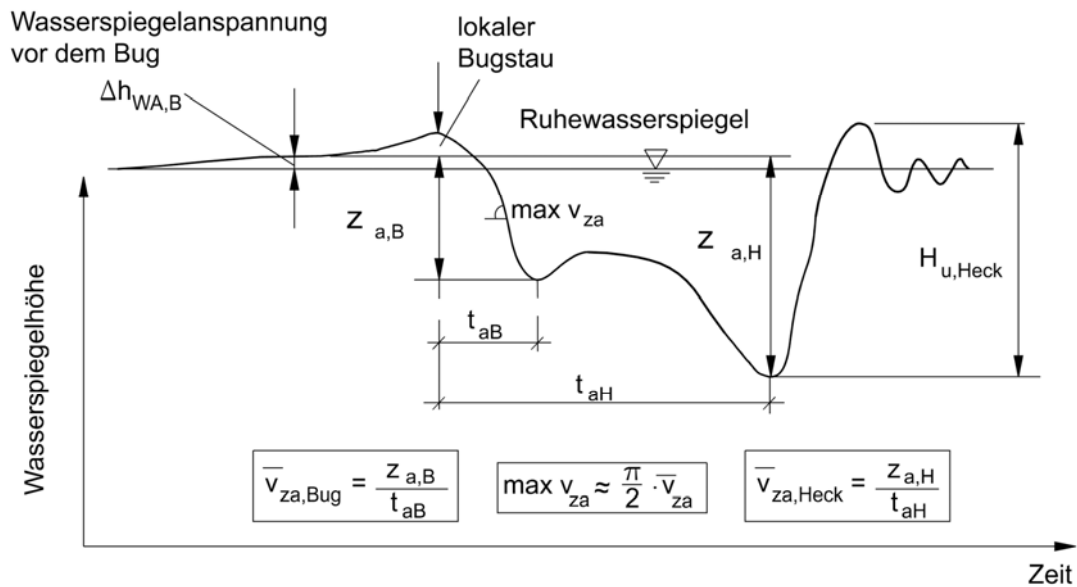


Bild 5.18 Prinzipieller Zusammenhang zwischen Absunk $z_{a,B}$ bzw. $z_{a,H}$ (Gl.n (7-1) und (7-2)) und Absinkzeit t_a für die geotechnische Bemessung

Allgemein gilt für kleine Uferabstände (Def. „kleiner Uferabstand“ = bis $b_E/2$) folgende Näherungsgleichung für die Zeit $t_{a,B}$ des maximalen Bugabsunks (inklusive Wasserspiegelanspannung vor dem Bug: $z_{a,B}$ nach Bild 5.18):

$$t_{a,B} \approx C \frac{u_{\text{eff}}}{v_{\text{SüG}}} \quad (5-47)$$

mit

C Konstante [-]
 $C = 1,7$ GMS und üGMS
 $C = 1,5$ Schlepper
 $C = 1,3$ ältere Schiffe mit fülliger Form, z. B. ES und SV

$t_{a,B}$ Absinkzeit am Bug [s] (s. Bild 5.18)

u_{eff} effektiver Uferabstand [m] (Abstand Schiffsachse - rechnerische Uferlinie bei RWS nach Bild 5.19)
 Beachte: die rechnerische Uferlinie liegt auf der Mitte der uferseitig vom Schiff verbleibenden restlichen Böschung

$v_{\text{SüG}}$ Schiffsgeschwindigkeit über Grund [m/s],
 die nach Gl. (5-20) mit der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_S und der Strömungsgeschwindigkeit v_{Str} verknüpft ist

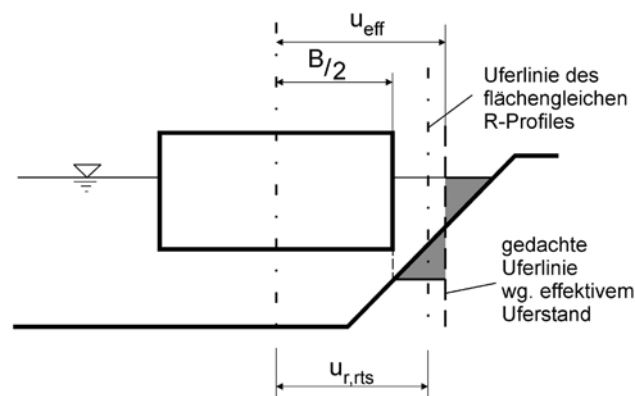


Bild 5.19 Definition des effektiven Uferabstands u_{eff} (Abstand Schiffsachse - rechnerische Uferlinie) im symmetrischen Trapez-Profil

Für den effektiven Uferabstand gelten im symmetrischen Trapezprofil je nach Fahrposition die folgenden Formeln (Definitionen vgl. Bild 5.19):

- Schiff überschreitet Böschungsfußpunkt:

$$u_{r,rs} < \frac{B}{2} + \frac{mh}{2} \rightarrow u_{\text{eff}} = \frac{u_{r,rs}}{2} + \frac{mh}{4} + \frac{B}{4} \quad (5-48)$$

Beachte: das Schiff darf mit der Kimmlinie die Böschung nicht überschreiten

- Schiff fährt außerhalb der Böschung:

$$u_{r,rs} \geq \frac{B}{2} + \frac{mh}{2} \rightarrow u_{\text{eff}} = u_{r,rs} \quad (5-49)$$

Die Absinkzeit kann auch bei extrem ufernaher Fahrt nicht beliebig klein werden, da in diesem Fall das Sekundärwellensystem begrenzend ist.

Für $v_s / \sqrt{gh_m} < 0,8$ gilt für die kleinstmögliche Absinkzeit:

$$t_{a,B} \geq t_{a,B,\text{Sek}} \quad (5-50)$$

mit

$t_{a,B}$ Absinkzeit am Bug allgemein [s]

$t_{a,B,\text{Sek}}$ Absinkzeit der maximalen Sekundärwelle am Bug [s] nach Gl. (5-51)

Die Absinkzeit der Sekundärwellen am Bug berechnet sich für die Quer- und Schrägwellen getrennt aus den folgenden Gleichungen:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{a,B,\text{Sek}} = \pi \frac{v_s^2}{g v_{\text{SüG}}} \text{ für Querwellen} \\ t_{a,B,\text{Sek}} = \frac{2}{3} \pi \frac{v_s^2}{g v_{\text{SüG}}} \text{ für Schrägwellen} \end{array} \right\} \quad (5-51)$$

In Gl. (5-50) wird das Maximum der beiden mit Gl. (5-51) errechneten Werte, somit die Absinkzeit der Querwellen am Bug, eingesetzt. Die Werte nach Gl. (5-51) sind auch im Sonderfall reiner Sekundärwellenbelastung, z. B. bei Sportbooten, anzusetzen.

Bei hecklastig vorgetrimmten Schiffen, zum Beispiel bei Leerfahrt (Ballastfahrt) und bei schnelleren kleinen Fahrzeugen, bei einem Schlepper oder einem Sportboot, dominiert das Heckwellensystem. Für die Absinkzeit am Heck $t_{a,H}$ gilt

$$t_{a,H} \approx t_{a,B} + \frac{L_{\text{pris}}}{v_{\text{SüG}}} \quad (5-52)$$

mit

L_{pris} Länge des Fahrzeugbereiches mit weitgehend prismatischem Querschnitt [m]

$L_{\text{pris}} \approx 0,9 L$ 2-gliedriger Schubverband

$L_{\text{pris}} \approx 0,8 L$ GMS, ES

$L_{\text{pris}} \approx 0,3 L$ Sportboot mit Spiegelheck

$L_{\text{pris}} \approx 0,0 L$ Schlepper

Die durchschnittliche Absinkgeschwindigkeit \bar{v}_{za} ergibt sich aus dem Quotienten von maßgebender Wellenhöhe und zugehöriger Absinkzeit.

5.5.5 Sekundärwellen

5.5.5.1 Allgemeines

Alle in 5.5.5.2 und 5.5.5.3 aufgeführten Gleichungen gelten nur bis zur Gleitgeschwindigkeit des Schiffes gemäß Gl. (5-69) in 5.5.5.4. Bis zu dieser Geschwindigkeit nehmen die Sekundärwellenhöhen zu. Für größere Schiffsgeschwindigkeiten nehmen sie wieder ab. Für diesen Sonderfall wird für Sportboote eine Näherungsgleichung in 5.5.5.4 angegeben.

Ausgehend von Bug und Heck werden von einem fahrenden Schiff Schräg- und Querwellen ausgelöst (Bild 5.20). Sie bilden das Sekundärwellensystem. Die Wellen überlagern sich und bilden markante Interferenzlinien aus, an denen die größten Wellenhöhen auftreten.

Für Froudesche Tiefenzahlen $Fr_h = v_s / \sqrt{gh}$ bis 0,7, in grober Näherung auch bis 0,8, ist die Interferenzlinie mit dem Kelvinschen Winkel α_K von ca. 19° gegen die Schiffsachse geneigt. Die Fronten der Schrägwellen sind um $\beta_W \approx 55^\circ$ gegenüber der Schiffsachse geneigt und damit auch gegenüber dem Kanalufer, wenn annähernd uferparallel gefahren wird. Wird nicht uferparallel gefahren, so ist ein veränderter Auftreffwinkel der Schrägwellen in den folgenden Gleichungen zu berücksichtigen.

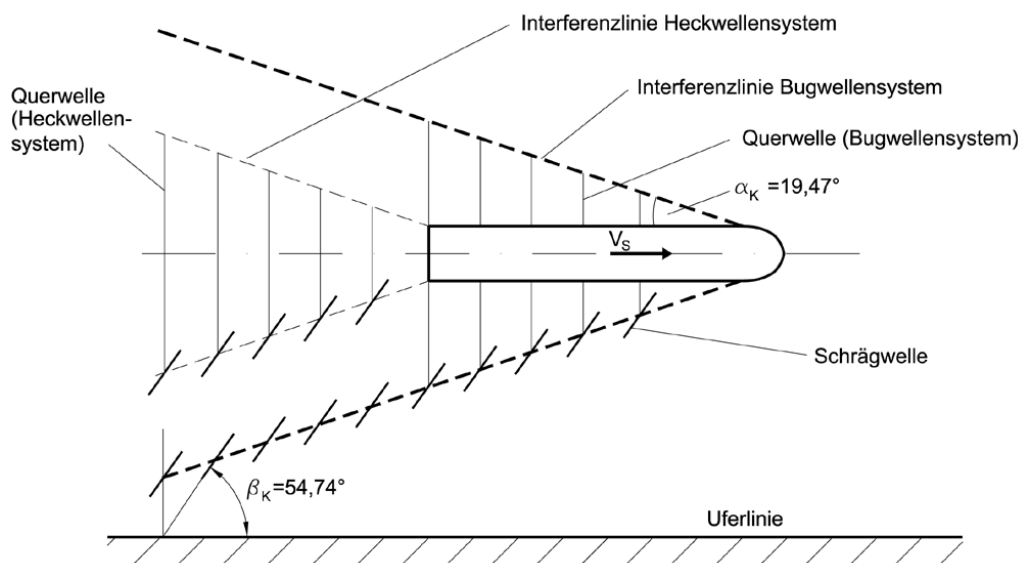


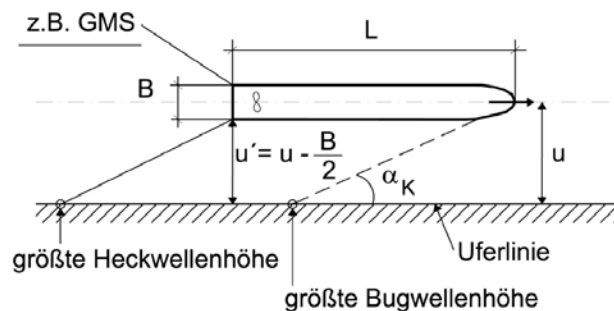
Bild 5.20 Sekundärwellensystem für $Fr_h \leq 0,8$

Die Sekundärwellen breiten sich zum Ufer hin aus und nehmen dabei in der Höhe ab. Die skalierende Größe ist hierbei der Uferabstand u , der für die Berechnung der Sekundärwellenhöhen, abweichend von den Ansätzen für das Primärwellensystem, stets in Höhe des (näherungsweisen) Ruhewasserspiegels gemessen wird. Querwellen nehmen stärker ab als Schrägwellen. Da die Querwellen des Heckwellensystems insbesondere bei kurzen, schnellen Schiffen und bei Leerfahrern stärker ausgebildet sind als die des Bugwellensystems, die Bugschrägwellen jedoch stärker als die Heckschrägwellen, sind i. d. R. die drei im Folgenden beschriebenen Bemessungsfälle zu beachten (s. Bild 5.21).

Bei der Ermittlung von u bzw. u' ist bei großen $\Delta \bar{h}$ ggf. der durch das Rückströmungsfeld abgesenkte Wasserspiegel zu beachten. u und u' reduzieren sich in dem Fall in etwa um $m \Delta \bar{h}_u$ ($\Delta \bar{h}_u$ nach Gl. (5-26) in 5.5.3).

Abstandsfall A

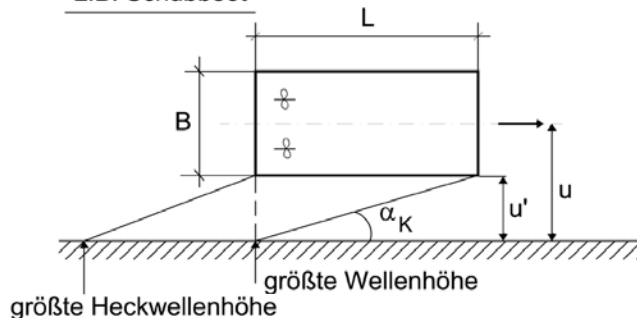
Bug- oder Hecksekundärwellen treffen auf das Ufer;
keine Überlagerung mit Primärwellensystem



Abstandsfall B

Interferenzlinie des Bugsekundärwellensystems überlagert sich
mit der Heckquerwelle des Primärwellensystems

z.B. Schubboot



Abstandsfall C

Bugquerwelle überlagert sich mit der Heckquerwelle

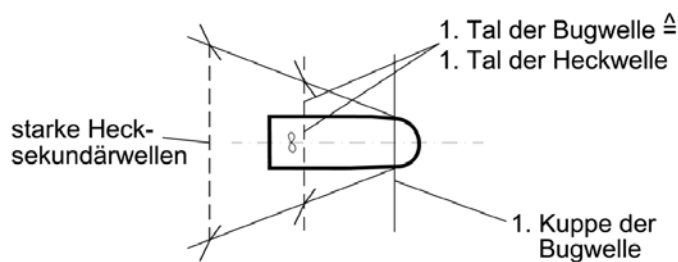


Bild 5.21 Standardabstandsfälle bei Sekundärwellen

Abstandsfall A

Für $u' < L \tan \alpha_K$, also lange Schiffe im Verhältnis zur Kanalbreite bzw. für kleine Uferabstände (Standardsituation für ES, GMS und SV in Kanälen), tritt i. d. R. keine bemessungsrelevante Überlagerung von Primär- und Sekundärwellensystemen auf. Die Sekundärwellenhöhen ergeben sich nach 5.5.5.2. Die Bemessung der erforderlichen Steingröße der Uferbefestigung kann dann getrennt für Primär- und Sekundärwellenfeld erfolgen (vgl. 6.2 und 6.4).

Ergänzende Information zu den Abstandsfällen:

Die Berechnung von Abstandsfall A mittels exakter Rechnung schließt die Abstandsfälle B und C ein.

Abstandsfall B

In breiten Kanälen oder bei kurzen Fahrzeugen kann es zu Überlagerungen der Heckquerwelle des Primärwellensystems mit den Interferenzen der Bug-Sekundärwellen kommen. Dies ist etwa bei $u' = L \tan \alpha_K$ der Fall.

Da sich die Wellen wegen ihrer Länge nicht immer exakt im o. g. Abstand überlagern können, wird empfohlen, statt des exakten Abstandes einen Abstands**bereich** $u'_\text{Ü}$ zu definieren, indem die Überlagerung erfolgt. Hieraus wurde die folgende Formel für die Wellensuperposition entwickelt, die den zu berücksichtigenden Anteil der Sekundärwellenhöhe H_{Sek} an der Heckwellenhöhe bei $u' = u'_\text{Ü}$ zu 100 % berücksichtigt und diesen beidseitig in einem Abstand, der mit der halben Sekundärwellenlänge korrespondiert, auf Null abklingen lässt. Auf der sicheren Seite liegend wird $f_{\text{red}} = 1$ angenommen.

$$H_{u,\text{Heck},\text{StBem}} = H_{u,\text{Heck}} + 0,5 f_{\text{red}} H_{\text{Sek}} \quad (5-53)$$

mit

f_{red} Reduzierungsfaktor für den zu berücksichtigenden Anteil der Sekundärwellenhöhe H_{Sek} an der Heckwellenhöhe

$$f_{\text{red}} = \frac{(0,5 \lambda_q \tan \alpha_K - |u' - u'_\text{Ü}|)}{(0,5 \lambda_q \tan \alpha_K)} \quad (5-54)$$

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m] nach Gl. (5-56) in 5.5.5.2

$H_{u,\text{Heck},\text{StBem}}$ Heckwellenhöhe in Ufernähe [m], relevant für die Steingrößenbemessung

$H_{u,\text{Heck}}$ Maximalwert der Heckwellenhöhe am schiffsnäheren Ufer [m] nach Gl. (5-32) in 5.5.4.4

u' Abstand Schiffswand – Uferlinie [m]

$u' = u - B/2$ (vgl. Bild 5.21)

$u'_\text{Ü}$ Abstands**bereich** [m], in dem die Überlagerung der Heckquerwelle des Primärwellensystems mit der Bug-Sekundärwelle erfolgt

α_K Kelvinscher Winkel [°] ($\alpha_K \approx 19^\circ$)

λ_q Wellenlänge der Heckquerwelle [m] nach Gl. (5-55)

Die für die Ermittlung der erforderlichen Steingröße maßgebende Wellenhöhe am Heck ergibt sich dann aus der Überlagerung von Bug-Sekundärwelle nach 5.5.5.2 und Heckquerwelle des Primärwellensystems nach 5.5.4.4. Da die Wellenlängen von Primär- und Sekundärwellensystem unterschiedlich sind, werden bei deren Überlagerung die ganze Primärwellenhöhe und die halbe Sekundärwellenhöhe angesetzt.

Die Überlagerungswellen sind besonders hoch bei fülligen oder stumpfen Bugformen, d. h. bei einzeln fahrenden Schubbooten, und wenn das Fahrzeug im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit fährt. Für einzeln fahrende Schubboote aber auch für große Sportboote muss deshalb ggf. die Schiffsgeschwindigkeit begrenzt werden, um die im Regelfall zwar seltenen, aber sehr großen Wellenbelastungen der Ufer zu vermeiden.

Abstandsfall C

Stark motorisierte kurze Boote, zum Beispiel Sportboote, können auch im allseits beschränkten Fahrwasser die Gleitgeschwindigkeit erreichen und überschreiten. Der hinsichtlich der Wellenentwicklung ungünstigste Fall, der mit einem Maximalwert des Leistungsbedarfs zusammenfällt, tritt bei Erreichen der Gleitgeschwindigkeit auf. Dies ist dann der Fall, wenn die wellenbildende Schiffslänge L_W der halben Sekundärquerwellenlänge entspricht. Der Bug liegt dabei auf der Höhe des ersten Wellenbergs des Bugquerwellensystems, das Heck liegt im Tal dieser Bugquerwelle und gleichzeitig im Tal des Heck-Sekundärquerwellensystems. Das Schiff muss quasi im eigenen Sekundärquerwellensystem bergauf fahren. Dieser Sonderfall wird in 5.5.5.2, Gl. (5-61) und zusätzlich in 5.5.5.4 behandelt. Es gilt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_q = 2 L_W \\ L_W \approx \beta_\lambda L \\ \lambda_q \approx 2\pi \frac{v_s^2}{g} \end{array} \right. \quad (5-55)$$

mit

L Schiffslänge [m]

L_W wellenbildende Schiffslänge [m]
(entspricht Länge in Höhe der Wasserlinie)

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s],
Beachte: $v_s \leq v_{s,gl}$ mit $v_{s,gl}$ nach Gl. (5-69)

β_λ Beiwert zur wellenbildenden Schiffslänge [-]
 $\beta_\lambda \approx 0,72$ für schnelle Schiffe, nach /Horn 1928/
 $\beta_\lambda \approx 0,90$ für gängige Binnenschiffe und Schubverbände

λ_q Wellenlänge der Querwellen [m]

Mit Gl. (5-55) kann für eine vorgegebene Schiffslänge z. B. die Schiffsgeschwindigkeit errechnet werden, bei der ein Schiff, für das Abstandsfall C zutrifft, ins Gleiten kommt.

Eine signifikante Überlagerung von Bug- und Heckquerwellen setzt schon bei $\lambda_q > 4/3 L_W$ ein.

5.5.5.2 Berechnung der Sekundärwellenhöhen

Für die Interferenzpunkte der Bug- und Heckschrägwellen gilt nach /Blaauw et al. 1984/ bzw. /Gates, Herbich 1977/:

Sekundärwellenhöhe H_{Sek} [m] auf der Interferenzlinie von Bug- und Heckschrägwellen

$$H_{Sek} = A_W \frac{v_s^{8/3}}{g^{4/3} (u')^{1/3}} f_{cr} \quad (5-56)$$

mit

A_W Wellenhöhenbeiwert [-] abhängig von Schiffsform, Schiffsabmessungen, Abladetiefe und Wassertiefe
Für Überslagsrechnungen kann angesetzt werden:

$A_W \approx 0,25$ für konventionelle Binnenschiffe und Schlepper

$A_W \approx 0,35$ für leere, einspurige Schubverbände

$A_W \approx 0,80$ für vollbeladene, mehrspurige Schubverbände; Sportboote

f_{cr} Geschwindigkeitsbeiwert [-], nach Gl. (5-57), Bereich: 1,0 ... 1,7

g Erdbeschleunigung [m/s²]

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m]

u' Abstand Schiffswand - Uferlinie [m], $u' = u - B/2$ (vgl. Bild 5.21)

Der Geschwindigkeitsbeiwert f_{cr} in Gl. (5-56) berücksichtigt, dass die Sekundärwellenhöhen im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit anwachsen. In Analogie zum Anstieg des Schiffswiderstands beim Erreichen der Stauwellengeschwindigkeiten gilt näherungsweise:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{cr} \approx 1,0 \quad \text{für } \frac{v_s}{v_{krit}} < 0,8 \\ \\ \text{und für } \frac{v_s}{v_{krit}} > 1,2 \\ \\ f_{cr} \approx 1,0 + 0,7 \left\{ \sin \left[\frac{2\pi}{0,8} \left(\frac{v_s}{v_{krit}} - 0,8 \right) \right] \right\}^2 \\ \\ \text{für } 0,8 \leq \frac{v_s}{v_{krit}} \leq 1,2 \end{array} \right\} \quad (5-57)$$

Beachte: sin(Bogenmaß)

Die Gl. (5-56) gilt streng genommen nur für solche Uferabstände u' , bei denen die Sekundärwellenhöhen am Ufer interferieren. Wegen zufälliger Unregelmäßigkeiten des Schiffspfad und der Sekundärwellen kann sie für Bemessungszwecke allgemein angewendet werden, wenn folgende Einschränkung beachtet wird:

$$u' \geq \frac{1}{2} \lambda_q \tan \alpha_K \quad (5-58)$$

mit

α_K Kelvinscher Winkel [°]

λ_q Wellenlänge der Heckquerwelle [m]

$$\lambda_q \approx 2\pi (v_s^2 / g)$$

Die Wellenlänge der Schrägwellen ergibt sich für $v_s / \sqrt{gh} < 0,8$ zu

$$\lambda_s = \frac{2}{3} \lambda_q \quad (5-59)$$

mit

λ_s Wellenlänge der Schrägwelle [m]

λ_q Wellenlänge der Heckquerwelle [m]

$$\lambda_q \approx 2\pi (v_s^2 / g) \quad (5-60)$$

Für reine Heckquerwellen gilt bis zum Erreichen der Gleitgeschwindigkeit:

Sekundärwellenhöhe $H_{\text{Sek},q}$ [m] reiner Heckquerwellen

$$H_{\text{Sek},q} = A_W \frac{v_s^2}{g} \left(\frac{B}{2u} \right)^{1/2} (f_{cr} + f_\lambda) \quad (5-61)$$

mit

A_W Wellenhöhenbeiwert [-], nach Gl. (5-56)

B Schiffsbreite [m]

f_{cr} Geschwindigkeitsbeiwert [-], nach Gl. (5-57)

f_λ Wellenlängenbeiwert [-], nach Gl. (5-62)

u Abstand zwischen Schiffsachse und Uferlinie [m] (vgl. Bild 5.19 bzw. Bild 5.21)

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

Mit dem Wellenlängenbeiwert f_λ wird die Überlagerung der Heckquerwellen mit der Bugquerwelle erfasst. Es gilt:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_\lambda \approx 0 \quad \text{für } \lambda_q \leq \frac{4}{3} L_W \\ \text{und für } \lambda_q > 2 L_W \\ f_\lambda = 0,9 \sin \left\{ \pi \left(\frac{2 L_W}{\lambda_q} - \frac{1}{2} \right) \right\} \\ \text{für } \frac{4}{3} L_W \leq \lambda_q \leq 2 L_W \end{array} \right. \quad (5-62)$$

Beachte: sin(Bogenmaß)

Da die Sekundärwellen beim Überschreiten einer bestimmten Steilheit brechen, gilt für die nach Gl.n (5-56) und (5-61) vorher bestimmten Sekundärwellenhöhen folgende Beschränkung:

für Schrägwellen:

$$H_{\text{Sek}} \leq \lambda_s / 2\pi \quad (5-63)$$

hier: H_{Sek} nach Gl (5-56), λ_s nach Gl. (5-59)

für Querwellen:

$$H_{\text{Sek},q} \leq \lambda_q / 2\pi \quad (5-64)$$

hier: $H_{\text{Sek},q}$ nach Gl (5-61), λ_q nach Gl. (5-60)

Die Gl.n (5-56), (5-61), (5-63) und (5-64) bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen in Kap. 6. Sie geben die Wellenhöhen an, die noch nicht durch die Uferböschung beeinflusst sind (Wellenhöhe in „Ufernähe“).

Beim Annähern an das Ufer verformen sich die Sekundärwellen durch die abnehmende Wassertiefe. Dieses Verhalten ist äußerst komplex. Vereinfachend wird der Einfluss des Ufers für die hier betrachteten Böschungsneigungen zwischen ca. 1 : 2 und 1 : 5 indirekt berücksichtigt, indem bei der Ableitung der Bemessungsformeln, zum Beispiel für die erforderlichen Steingrößen, von der Wellenhöhe in „Ufernähe“ ausgegangen wurde. Bei flacher als 1 : 5 geneigten Uferböschungen ist dieser Einfluss in den Bemessungsformeln nicht erfasst.

5.5.5.3 Zusätzliche Sekundärwellen in Analogie zum unvollkommenen Wechselsprung

Schon vor Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeit wird in Schiffsnähe eine Froude-Zahl von 1,0 erreicht, die mit den Maximalwerten der örtlichen Rückströmungsgeschwindigkeit und des Wasserspiegelabsunkes gebildet wird. Hinter dem Schiff ist die Froude-Zahl kleiner als 1, wodurch ein Fließwechsel auftritt. Dieser ist erst bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten und damit höheren Froude-Zahlen mit einer stabilen Wechselsprungwalze, der brechenden Heckquerwelle, verbunden. Im angesprochenen Geschwindigkeitsbereich können jedoch zusätzlich starke Heckquerwellen wie bei einem unvollkommenen Wechselsprung auftreten (s. Bild 5.22). Ihre Querausbreitung entspricht der Heckquerwelle. In erster Näherung kann ihre Höhe, die mit der Heckquerwelle des Primärwellensystems nach 5.5.4.4 interferiert, aus Gl. (5-61) für die Sekundärquerwellen errechnet werden.

Die Höhe dieser Wellen ist aus energetischen Gründen und wegen des Brechens bei großen Steilheiten zusätzlich wie folgt begrenzt:

$$H_{\text{Sek}} \leq \frac{v_s^2}{g} \quad (5-65)$$

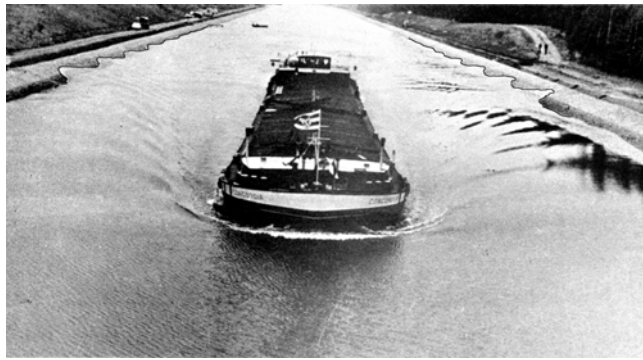


Bild 5.22 Fahrt des MS Concordia am Main-Donau-Kanal (Kriegenbrunner Messungen) im Bereich der kritischen Schiffsgeschwindigkeit ($v_s = 12 \text{ km/h}$) /Schäle, Mollus 1971/

5.5.5.4 Sekundärwellen kleiner Boote bei Gleitgeschwindigkeit und ufernaher Fahrt

Schnell fahrende Fahrgastschiffe und Sportboote können insbesondere bei Fahrt im Übergangsbereich zwischen Verdrängerfahrt und Gleiten sehr große Sekundärwellenhöhen hervorrufen. Die größten Sekundärwellenhöhen treten bei Gleitgeschwindigkeit im Uferabstand u^* auf, bei dem die erste Interferenzwellengruppe auf das Ufer trifft. In diesem ungünstigsten Fall beträgt die größte Wellenhöhe an den Interferenzpunkten der Schrägwellen des Heckwellensystems von Sportbooten

$$H_{\text{Sek,gl}} \approx 1,4 T \left(\frac{L}{u^*} \right)^{1/3} \quad (5-66)$$

mit

B Breite [m] des Sportboots bzw. des Fahrgastschiffes

$H_{\text{Sek,gl}}$ Sekundärwellenhöhe [m] bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit

L Länge [m] des Sportboots bzw. des Fahrgastschiffes

T Tiefgang [m] des Sportboots bzw. des Fahrgastschiffes

u^* Uferabstand [m], bei dem die erste Interferenzwellengruppe auf das Ufer trifft, $u^* \approx 0,5 B + 0,4 L$

Bei langsamerer Schiffsgeschwindigkeit oder bei viel größeren Werten als die Gleitgeschwindigkeit sowie allgemein für verschiedene Uferabstände sind die Wellenhöhen wieder geringer. Somit ergeben sich drei Geschwindigkeitsbereiche für die Sekundärwellenhöhenberechnung von Gleitern (s. Bild 5.23). Diese können nach /Maynord 2005/ unter Verwendung der Froude-Zahl, deren charakteristische Länge das verdrängte Wasservolumen ∇ ist, abgegrenzt werden.

$$Fr_{\nabla} = \frac{v_s}{\sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}}} \quad (5-67)$$

mit

c_B Blockkoeffizient [-], Schätzwert für Gleiter $\approx 0,4$

Fr_{∇} Froude-Zahl [-], bezogen auf das verdrängte Wasservolumen ∇ [–]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

∇ verdrängtes Wasservolumen [m^3], $\nabla = c_B \cdot L \cdot B \cdot T$

Für die Sekundärwellenhöhe $H_{\text{Sek,gl}}$ genau bei Gleitgeschwindigkeit und als Bezugsgröße in allen drei Bereichen nach Bild 5.23 gibt /Maynord 2005/ für Gleiter folgende Gleichung an

$$H_{\text{Sek,gl}} = \nabla^{1/3} \cdot C_{\text{May}} \cdot Fr_{\nabla 2}^{-0,58} \cdot \left(\frac{u}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0,42} \quad (5-68)$$

mit

C_{May} Koeffizient [-] zur Berücksichtigung des Trimmwinkels, hier $C_{\text{May}} \approx 0,8$

$Fr_{\nabla 2}$ Froude-Zahl [-], bezogen auf das verdrängte Wasservolumen ∇ zu Beginn des voll ausgebildeten Gleitens, hier $Fr_{\nabla 2} = 1,3$

u Uferabstand [m]

Nach /Söhnngen et al. 2010/ ergibt sich, aufbauend auf /Maynord 2005/, der in Bild 5.23 dargestellte Verlauf der Sekundärwellenhöhe als Funktion der Froude-Zahl Fr_{∇} , der auf geringere Schiffsgeschwindigkeiten als die Gleitgeschwindigkeit extrapoliert wurde. Auf der vertikalen Achse wurde das Verhältnis von Sekundärwellenhöhe zur Sekundärwellenhöhe bei Gleitgeschwindigkeit aufgetragen und Messwerten gegenübergestellt.

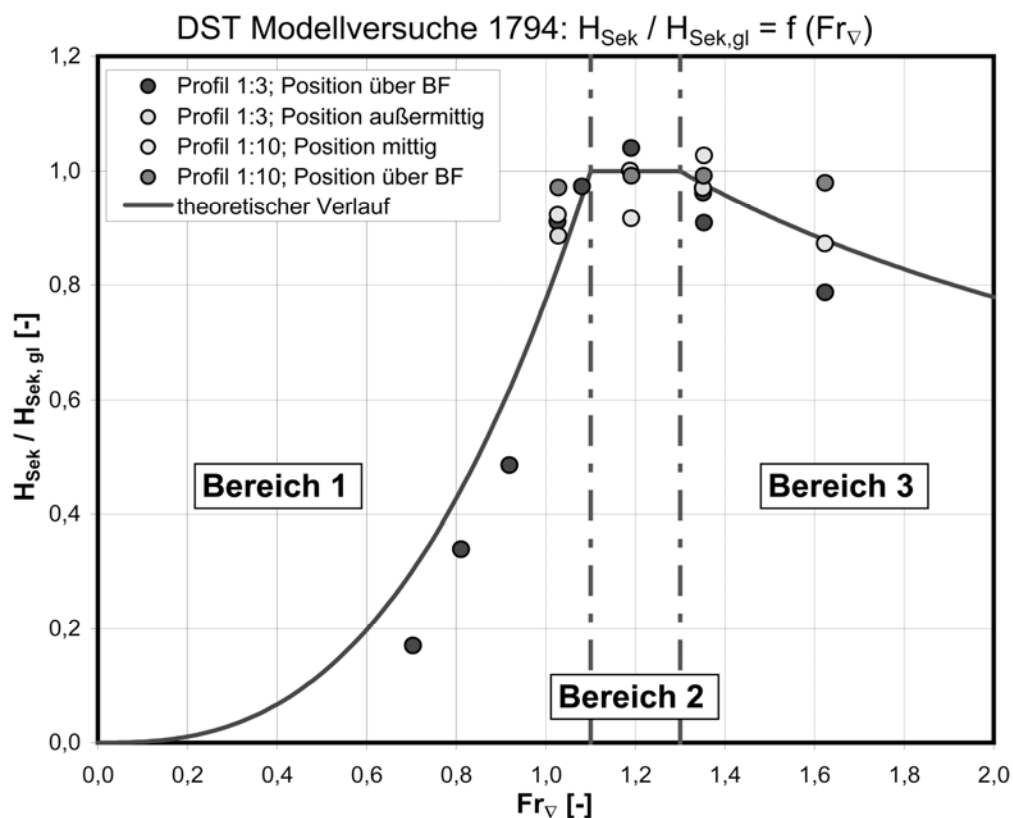


Bild 5.23 Theoretischer Verlauf der Sekundärwellenhöhe für Sportboote sowie Messwerte aus Modellversuchen („BF“ \triangleq Böschungsfuß)

Die zugehörigen Kennwerte der Froude-Zahl Fr_{∇} für die drei Bereiche sowie die Formeln für die Gleitgeschwindigkeiten und Sekundärwellenhöhen sind wie folgt angegeben:

• **Geschwindigkeitsbereich 1: $Fr_{\nabla} < 1,1$ bzw. $v_s < v_{s,gl1}$**

Die Froude-Zahl $Fr_{\nabla 1}$, die den Beginn des Übergangsbereichs kennzeichnet, wird von /Söhngen et al. 2010/ und /Maynord 2005/ mit 1,1 angegeben. Damit ergibt sich für $Fr_{\nabla} < 1,1$ als Bezugsgröße eine Gleitgeschwindigkeit $v_{s,gl1}$ von

$$v_{s,gl1} = 1,1 \sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}} \quad (5-69)$$

mit

∇ verdrängtes Wasservolumen [m^3], $\nabla = c_B \cdot L \cdot B \cdot T$

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

$v_{s,gl1}$ Gleitgeschwindigkeit [m/s] im Übergang von der Verdrängerfahrt zum Gleiten

Für die bei Fahrt bis zur Gleitgeschwindigkeit $v_{s,gl1}$ ansteigende Sekundärwellenhöhe ergibt sich in Analogie zu Gl. (5-56) folgende Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit:

$$H_{Sek} = H_{Sek,gl} \cdot \left(\frac{v_s}{v_{s,gl1}} \right)^{8/3} \quad (5-70)$$

mit

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m]

$H_{Sek,gl}$ Sekundärwellenhöhe [m] bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit, nach Gl. (5-69)

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

• **Geschwindigkeitsbereich 2: $1,1 \leq Fr_{\nabla} \leq 1,3$ bzw. $v_{s,gl1} < v_s < v_{s,gl2}$**

In diesem Übergangsbereich wird die maximale Wellenhöhe erreicht. Sie tritt auf bis zum Erreichen des Übergangs zum voll ausgebildeten Gleiten bei $v_{s,gl2}$ nach Gl. (5-72). Die Froude-Zahl $Fr_{\nabla 2}$, die den Übergang zum voll ausgebildeten Gleiten kennzeichnet, wird von /Maynord 2005/ mit 1,3 angegeben.

Für die Sekundärwellenhöhe gilt:

$$H_{Sek} = H_{Sek,gl} \text{ nach Gl. (5-68)} \quad (5-71)$$

Je nach Schiffstyp kann dieser Geschwindigkeitsbereich variieren. Die o. g. Grenzen sind ggf. anhand von Versuchen genauer festzulegen.

• **Geschwindigkeitsbereich 3: $Fr_{\nabla} > 1,3$ bzw. $v_s > v_{s,gl2}$**

Für Werte von $Fr_{\nabla} > 1,3$, im Bereich des voll ausgebildeten Gleitens, ergibt sich als Bezugsgröße eine Gleitgeschwindigkeit $v_{s,gl2}$ von

$$v_{s,gl2} = 1,3 \sqrt{g \cdot \nabla^{1/3}} \quad (5-72)$$

mit

∇ verdrängtes Wasservolumen [m^3], $\nabla = c_B \cdot L \cdot B \cdot T$

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

$v_{s,gl2}$ Gleitgeschwindigkeit [m/s] im Übergang zum voll ausgebildeten Gleiten

Bei Fahrten über die Gleitgeschwindigkeit $v_{s,gl2}$ hinaus nimmt die Wellenhöhe wieder ab. Nach /Maynord 2005/ ergibt sich dafür folgendes Verhältnis:

$$H_{\text{Sek}} = H_{\text{Sek,gl}} \cdot \left(\frac{v_s}{v_{s,gl2}} \right)^{-0,58} \quad (5-73)$$

mit

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m]

$H_{\text{Sek,gl}}$ Sekundärwellenhöhe [m] bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit, nach Gl. (5-68)

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

5.5.5.5 Wellenauflauf

Als Wellenauflaufhöhe von Wind- und Sekundärschrägwellen wird die vertikal gemessene Höhe z_{AL} über dem Ruhewasserspiegel (RWS) bis zum höchsten erreichten Auflaufpunkt auf der Böschung definiert.

- Sie ist am größten, wenn die Ausbreitung der Wellen senkrecht zum Ufer (Wellenkämme parallel zum Ufer) erfolgt. Mit zunehmendem Winkel β_w zwischen Ausbreitungsrichtung und Ufernormaler nimmt die Auflaufhöhe ab (s. **„Auflaufende Wellen“**).

Bei uferparalleler Ausbreitung, wie dies bei den schiffserzeugten Heckquerwellen der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Wellenhöhe am Ufer erhalten bleibt. Hierbei ist für Sekundärwellen deren asymmetrische Form zu beachten. Die größte Wasserspiegelerhebung über dem RWS ist dabei größer als die halbe Wellenhöhe. Sie wird im Folgenden auch als Auflaufhöhe bezeichnet (s. **„Parallel laufende Wellen“**).

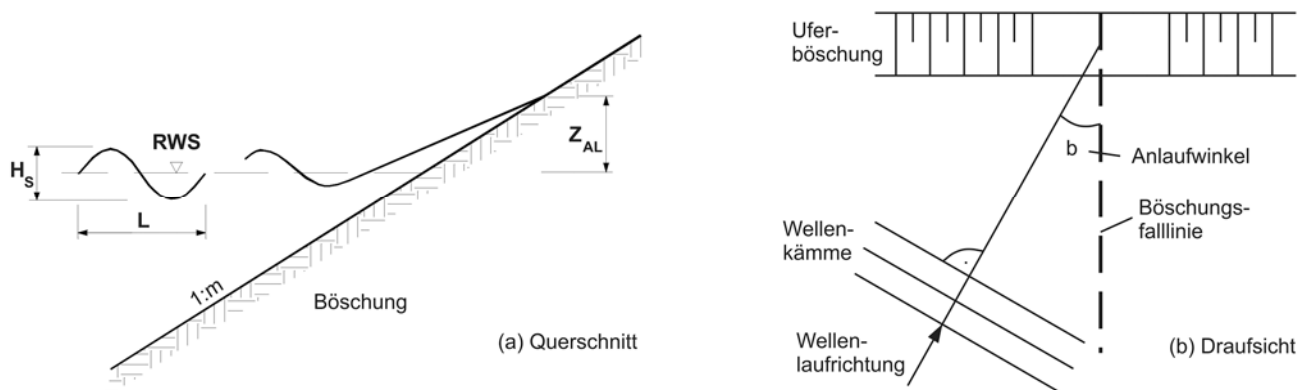


Bild 5.24 Definitionen zur Wellenauflaufhöhe z_{AL} : (a) Querschnitt, (b) Draufsicht

Für die Ermittlung der Auflaufhöhe stehen eine Vielzahl empirischer Formeln zur Verfügung, die je nach Entwicklung Wellenhöhe, -länge und -periode, Böschungsneigung und -profil (konkav/konvex) sowie Wassertiefe beinhalten.

• Auflaufende Wellen

Allgemein gilt, dass die Auflaufhöhe mit der Zunahme von Hohlraumgehalt und Oberflächenrauheit der Böschung abnimmt, mit steiler werdender Böschung, zunehmender Wellenhöhe und Wellenperiode aber zunimmt.

In /CUR-TAW 1992/ wird eine Formel für den Wellenauflauf angegeben, die auch den Winkel zwischen Wellenfront und Böschung sowie die Oberflächenrauheit des Deckwerks berücksichtigt:

Wellenauflaufhöhe z_{AL} [m] von Schrägwellen

$$z_{\text{AL}} = C_A \cos \beta_w \cdot f_{\text{red}} \cdot \frac{1}{m} T \sqrt{g H_S} \geq \frac{H_S}{2} \quad (5-74)$$

mit

C_A Konstante für den Wellenaufbau [-]

$C_A = 0,4$ für regelmäßige Wellen und Schiffswellen /EAK 1993/

$C_A = 0,74$ für unregelmäßige Windwellen /CUR-TAW 1992/

f_{red} Reduktionsfaktor für Energieverluste beim Wellenaufbau [-], s. Tabelle 5.2

H_S Bemessungswellenhöhe [m]

Hinweis: Maximalwert der Sekundärwellenhöhe nach Gl. (5-56) in 5.5.5.2 (Schrägwellen) und derjenigen nach 5.5.5.4 (Schrägwellen kleiner, schneller Boote) unter Beachtung von Gl. (5-65) in 5.5.5.3 sowie ggf. der Windwellenhöhe nach 5.7.

m Böschungsneigung [-]

T mittlere Wellenperiode [s]

β_W Anlaufwinkel zwischen Wellenkammorthogonaler und Böschungsfalllinie [°] (s. Bild 5.24)

Beachte: $\beta_W \approx 55^\circ$ gilt für Schrägwellen des Sekundärwellensystems bei ufernaher Fahrt und $Fr_h < 0,7$ (in grober Näherung auch bis $Fr_h = 0,8$)

z_{AL} Wellenaufbauhöhe [m]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

Die Formel gilt für Böschungsneigungen bis $m = 3$ (1:3) und Anlaufwinkel bis etwa 55° . Eine ähnliche Formel, die mehr Eingangsparameter berücksichtigt, wird in /EAK 2002/ genannt. Das Ergebnis ist auch ein Anhaltswert für den aufbaubedingten Anteil des Freibords (Abstand RWS - Böschungskrone). Damit ist eine ausreichende Sicherheit gegen Überströmen gegeben. Statistisch wird der berechnete Wellenaufbau nur von 2 % aller Wellen überschritten.

Weist die Böschung eine Berme auf, so wird zur Berechnung des Wellenaufbaus auf weiterführende Literatur verwiesen /Przedwojski et al. 1995/.

Die Zunahme von Oberflächenrauheit und Hohlraumanteil der Böschungsoberfläche reduziert den Wellenaufbau erheblich, was durch einen Reduktionsfaktor f_{red} erfasst wird (s. Tabelle 5.2). Für natürliche Böschungen muss f_{red} an Hand der Angaben der Tabelle 5.2 abgeschätzt werden.

Bei Böschungssicherungen aus geschütteten Stein- und Kornmaterialien nimmt die Wellenaufbauhöhe schiffserzeugter Wellen in Abhängigkeit vom Hohlraumanteil des Deckwerks nach /Abromeit 1997/ wie folgt ab:

$$z_{AL,St} = \frac{H_S - d_D}{H_S} n z_{AL,0} \geq 0 \quad (5-75)$$

mit

d_D Deckschichtdicke [m]

H_S Bemessungswellenhöhe [m]

n Hohlraumanteil [-]

$z_{AL,St}$ Wellenaufbauhöhe auf Steinschüttungen [m]

$z_{AL,0}$ Wellenaufbauhöhe für $f_{red} = 1$ [m]

Eine Grobkiesfilterlage oder eine gleichwertige Schicht darf der Deckschicht hinzugerechnet werden.

Tabelle 5.2 Reduktionsfaktor f_{red} für den Wellenaufbau für verschiedene Deckschichtbauweisen, nach /CUR-TAW 1992/ und ergänzt (*)

Deckwerk	Reduktionsfaktor f_{red}
glatt, geschichtet	1
Betonformsteine	0,9
Böschungsschutz durch z.B. Basaltblöcke, Steinblöcke oder Grasbewuchs	0,85 - 0,9
eine Lage Steinschüttung auf undurchlässigem Untergrund	0,8
gesetzte Steine	0,75 - 0,8
geschüttete runde Steine	0,6 - 0,65
geschüttete Bruchsteine	0,5 - 0,6
geschüttete Bruchsteine mit Teilverguss (*)	0,6 - 0,9

• Parallel laufende Wellen

Die Auflaufhöhe nach Gl.n (5-74) bzw. (5-75) ist für große β_w nach oben begrenzt. Für den Grenzfall $\beta_w = 90^\circ$ (Querwellen bei uferparalleler Fahrt) gilt:

Wellenaufbauhöhe z_{AL} [m] von parallel laufenden Wellen

$$z_{\text{AL}} = \Delta H_{\text{S,oWI}} \approx \frac{\pi}{8} \frac{H_s^2}{\lambda_q} \frac{\cosh \frac{2\pi h}{\lambda_q}}{\left(\sinh \frac{2\pi h}{\lambda_q} \right)^3} \left[2 + \cosh \left(\frac{4\pi h}{\lambda_q} \right) \right] + \frac{H_s}{2} \geq H_s / 2 \quad (5-76)$$

mit

h örtliche Wassertiefe $\approx H_s$ im Brechpunkt am Ufer [m]

$\Delta H_{\text{S,oWI}}$ Wellenhöhenanteil oberhalb der Wasserlinie [m]

H_s Bemessungswellenhöhe [m]

Hinweis: Größtswert der Sekundärwellenhöhen nach 5.5.5.2, Gl. (5-56) (Bug- und Heckschrägwellen), Gl. (5-61) (Heckquerwellen) sowie nach 5.5.5.4 (Schräg- und Heckwellen kleiner, schneller Boote) unter Beachtung von Gl. (5-65) (aus 5.5.5.3)

z_{AL} Wellenaufbauhöhe [m]

λ_q Wellenlänge der Querwellen [m] nach 5.5.5.1, Gl. (5-55)

Hinweis: Gl. (5-76) gilt nur für ungebrochene Wellen. Nach Gl. (5-64) kann sie näherungsweise angewendet werden, wenn $H_s \leq \lambda_q / 2\pi$ ist.

5.5.6 Begegnung und Überholung

Modell- und Naturversuche haben gezeigt, dass die größten Rückströmungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen in der Einzelfahrt auftreten. Dies deshalb, weil auch Einzelfahrer, obwohl sie ausreichend Platz im Kanal zur Verfügung haben, temporär mit ähnlich geringen Uferabständen verkehren, wie sie bei Begegnungen oder Überholungen auftreten. Dabei fahren sie allerdings mit viel größeren Schiffsgeschwindigkeiten als in Manöversituationen. Begegnungen und Überholungen stellen deshalb einen Sonderfall der Bemessung gegen schiffserzeugte Strömungen und Wellen des Primärwellensystems mit Ausnahme der Schraubstrahlbelastung dar.

Für diese besonderen Fahrsituationen gibt es keine belastbaren Näherungsverfahren zur Berechnung der schiffsinduzierten Belastungen aus dem Primärwellenfeld. Die folgenden Berechnungsannahmen stellen eine grobe Approximation dar und betreffen nur die Wellenhöhen, nicht aber die schiffsinduzierten Strömungsgeschwindigkeiten.

Die häufiger auftretende Fahrsituation ist die **Begegnung** zweier Schiffe. Hier gilt folgende auf der sicheren Seite liegende Grenzbetrachtung:

- (1) Beide Fahrzeuge begegnen mit gleicher Schiffsgeschwindigkeit. Jedes Fahrzeug erzeugt im zugehörigen Querschnittsbereich sein eigenes Rückströmungsfeld, das entgegen der Fahrt des anderen Schiffes gerichtet ist. In erster Näherung kann dieser Grenzfall so behandelt werden, als ob beide Schiffe in gleicher Richtung fahren und sich die eingetauchten Schiffsquerschnittsflächen addieren. Bezugsquerschnitt ist der Gesamt-Kanalquerschnitt.

Der andere, seltenere Fall im Kanal ist die **Überholung**. Im Normalfall (1) fährt das eine (meist voll abgeladene) Schiff sehr langsam, das andere (meist leere) sehr schnell. Ein Sonderfall (2) tritt auf, wenn beide Schiffe kurzzeitig mit annähernd gleicher Geschwindigkeit nebeneinander herfahren. So kann von folgenden zwei, auf der sicheren Seite liegenden Grenzfällen ausgegangen werden:

- (1) Das überholte Schiff steht auf der Stelle und der Überholer fährt i. d. R. mit $0,8 v_{krit}$ (des Einzelfahrers im Original-Kanalprofil) vorbei. In diesem Fall bewegt sich das erste Schiff in einem um die Schiffsquerschnittsfläche des zweiten Fahrzeugs reduzierten Kanalquerschnitt. Dabei kann der hier empfohlene Bemessungswert der relativen Schiffsgeschwindigkeit des Überholers von $0,8 v_{krit}$ (bez. Original-Kanalprofil) bei nun kleinerem Kanalquerschnitt sogar größer als $1,0 v_{krit}$ (bez. reduzierter Kanalquerschnitt) sein. Trifft dies zu, ist von $1,0 v_{krit}$ (bez. reduzierter Kanalquerschnitt) auszugehen.
- (2) Beide Schiffe fahren mit annähernd der gleichen Schiffsgeschwindigkeit $0,8 v_{krit}$ (des Einzelfahrers im Original-Kanalprofil). Der maßgebende eingetauchte Schiffsquerschnitt entspricht der Summe aus beiden Einzel-Schiffsquerschnitten. $0,8 v_{krit}$ des Einzelfahrers kann dabei $1,0 v_{krit}$ des „Doppelschiffes“ überschreiten. Dann ist $1,0 v_{krit}$ dieses „Doppelschiffes“ maßgebend.

5.6 Hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmung (Schraubenstrahl)

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf ein Gewässer ohne Grundströmung. Weiterhin bleibt die Nachlaufgeschwindigkeit hinter dem Schiff, die sich mit der Grundströmung dem Schraubenstrahl überlagert, zunächst unberücksichtigt. Beide Einflüsse werden in 6.3 berücksichtigt.

5.6.1 Induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls im Stand (Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s = 0$)

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit eines Propellers wird für den Fall der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s = 0$ (Propellerfortschrittsgrad $J = 0$) berechnet. Dies trifft bei Standprobenbedingungen bzw. bei standprobenähnlichen Manövern zu. Es werden die im Folgenden beschriebenen Ansätze zu Grunde gelegt.

- **Propeller ohne Düse** (s. Bild 5.25)

Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 nach vereinfachter Strahltheorie [m/s]

$$v_0 = 1,60 f_N n_{Nenn} D \sqrt{K_T} \quad (5-77)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m] (aus Tabelle 5.1)

f_N Faktor zur einsetzbaren Propellerdrehzahl [-]

Empfehlung nach /EAU 2004/:

$f_N \approx 0,75$ für Anfahrmanöver aus dem Stand

K_T Schubbeiwert des Propellers für $J = 0$ [-], $0,25 \leq K_T \leq 0,50$ nach /EAU 2004/

n_{Nenn} Nenndrehzahl des Propellers [1/s], s. Tabelle 5.1

Beachte: in Tabelle 5.1 in [1/min]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit nach erfolgter Strahlkontraktion [m/s]

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 erreicht bei Propellern ohne Düse im Abstand $D/2$ hinter der Propellerebene am Ort der maximalen Strahlkontraktion ihren Maximalwert. Der Strahlquerschnitt hat an dieser Stelle den Durchmesser

$$d_0 \geq \frac{D}{\sqrt{2}} \quad (5-78)$$

mit

d_0 Strahldurchmesser am Ort der maximalen Kontraktion [m]

D Propellerdurchmesser [m] aus Tabelle 5.1

Abschätzung von K_T als obere Grenze (nach /Peters 2002/):

$$K_T = 0,55 \cdot \frac{P}{D} \quad \text{für} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < \frac{P}{D} < 1,4 \\ J = 0 \end{array} \right\} \quad (5-79)$$

mit

P Konstruktionssteigung [m]

P/D Konstruktionssteigungsverhältnis [-]

$P/D \approx 0,7$ Hauptantrieb Binnenschiff

$P/D \approx 1,0$ Hauptantrieb Schubboot und Bugstrahlruder

Wenn neben P/D auch das Flächenverhältnis A_A / A_0 (A_A – Anströmfläche vor dem Propeller, A_0 – Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller; s. Bild 5.25) und die Flügelzahl z des Propellers bekannt sind, kann zur Berechnung von K_T eine Polynomapproximation aus Versuchen /Oosterveld, Oossanen 1975/ verwendet werden. Bei hinreichender Geometrieinformation können auch Berechnungsprogramme eingesetzt werden (z. B. /PROFIX 2002/).

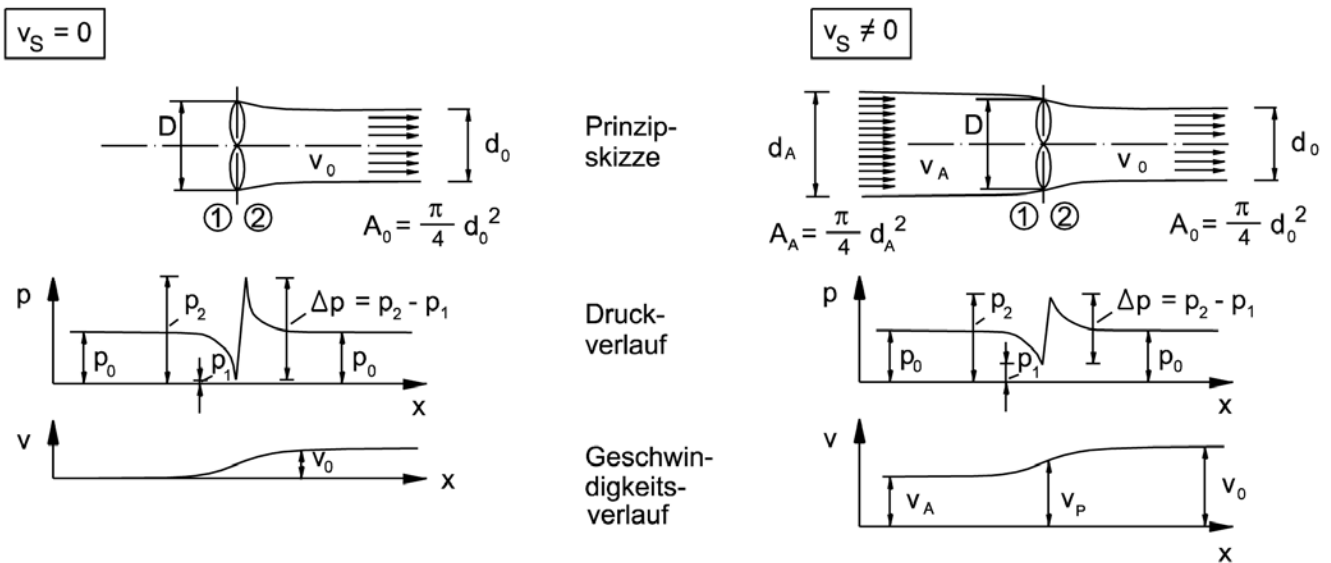


Bild 5.25 Propeller ohne Düse als idealer Druckbeschleuniger

 links: $v_S = 0$;

 rechts: $v_S \neq 0$

oben: Veränderung der Geschwindigkeit beim Durchströmen des Propellers

Mitte: zugehöriger Druckverlauf

unten: zugehöriger Geschwindigkeitsverlauf

 Symbole: v_S – Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s], v_A – Anströmgeschwindigkeit des Propellers [m/s];
 v_P – Geschwindigkeit in der Propellerebene [m/s]

• ummantelte Propeller (mit Düse)

 Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 durch ummantelte Propeller [m/s]

$$v_0 = 1,60 \sqrt{0,5 f_N n_{\text{Nenn}} D \sqrt{K_{T,DP}}} \quad (5-80)$$

mit

 $K_{T,DP}$ Schubbeiwert des Gesamtsystems Düse - Propeller für $J = 0$ [-]

 Abschätzung von K_T als obere Grenze (nach /Peters 2002/):

$$K_{T,DP} = 0,67 \cdot \frac{P}{D} \quad \text{für} \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < \frac{P}{D} < 1,8 \\ J = 0 \end{array} \right\} \quad (5-81)$$

Auch hier kann zur Berechnung von K_T eine Polynomapproximation aus Versuchen /Yosifov et al. 1986/ verwendet werden, wenn neben P/D auch das Flächenverhältnis A_E/A_0 (A_E – Eintrittsfläche in die Propellerebene, A_0 – Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller) und die Flügelzahl z des Propellers bekannt sind. Bei hinreichender Geometrieeinformation steht auch hier ein Berechnungsprogramm zur Verfügung /DVPFIX 2002/.

• **Näherungsrechnung** ausgehend von der **installierten Maschinenleistung**

 Maximalwert der induzierten Anfangsgeschwindigkeit v_0 infolge der installierten Maschinenleistung [m/s]

$$v_0 = C \left(\frac{f_P P_{d,Nenn}}{\rho_W D^2} \right)^{1/3} \quad (5-82)$$

mit

C Beiwert [-]

$C \approx 1,2-1,4$ für Propeller mit Düse

$C \approx 1,5$ für nicht ummantelte Propeller

f_P Faktor zur einsetzbaren Maschinenleistung [-],

Empfehlung nach /EAU 2004/:

$f_P \approx 0,42$ für Anfahrmanöver aus dem Stand (Zusammenhang $f_P = f_N^3$)

$P_{d,Nenn}$ Nennleistung pro Propeller [W], s. Tabelle 5.1

Beachte: in Tabelle 5.1 in [kW]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit [m/s] (bei Propellern ohne Düse nach erfolgter Strahlkontraktion)

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m³]

5.6.2 Geschwindigkeit des Propellerstrahls bei Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s \neq 0$

Mit Zunahme der Fahrt des Schiffes steigt die Propellerzustromgeschwindigkeit (Propellerfortschrittsgrad $J \neq 0$). Dabei erfolgt auch eine Veränderung der Geschwindigkeit des Propellerstrahls von v_0 auf v_{0J} . Im Gegensatz zu anderen Definitionen in der schiffbautechnischen Literatur beinhaltet v_{0J} den Anteil der Anströmgeschwindigkeit, d.h. v_{0J} entspricht dem Betrag der resultierenden Geschwindigkeit, mit der sich das Wasser im Propellerstrahl relativ zum Schiff nach hinten bewegt. Bei Propellern ohne Düse sinkt v_{0J} im Bereich von kleinen Fortschrittsgraden zunächst geringfügig gegenüber v_0 (bei $v_s = 0$) ab mit nachfolgendem Anstieg. Der Anstieg hängt wesentlich vom Konstruktionssteigungsverhältnis des Propellers P/D ab und führt im praxisrelevanten Bereich von P/D mit wachsendem Fortschrittsgrad wieder auf Werte von $v_{0J} \approx v_0$. Bei Düsenpropellern tritt die Absenkung bei kleinen Fortschrittsgraden nicht auf. In besserer Näherung kann im praxisüblichen Bereich für freie Propeller

$$v_{0J} \approx v_0 - \frac{1}{3} v_A \quad (5-83)$$

angenommen werden. Für Düsenpropeller ist folgende Näherungsformel anzuwenden

$$v_{0J} \approx v_0 + \frac{1}{3} \frac{v_A^2}{v_0} \quad (5-84)$$

Diese Gleichungen können verwendet werden, wenn keine Angaben über die Drehzahl und die Konstruktionssteigung des Propellers vorliegen und deshalb v_0 mit Gl. (5-82) errechnet wird.

Genauere Abschätzungen der Schubbeiwerte K_{TJ} und $K_{T,DPJ}$ und damit der Strahlgeschwindigkeit v_{0J} als obere Grenze sind möglich, wenn für den Propeller D , n und P/D bekannt sind:

• **Propeller ohne Düse**

$$K_{TJ} = 0,55 \frac{P}{D} - 0,46 J \quad (5-85)$$

induzierte Anfangsstrahlgeschwindigkeit v_{0J} [m/s] eines Propellers ohne Düse bei beliebiger Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s \neq 0$

$$v_{0J} = \frac{\sqrt{\left(J^2 + 2,55 K_{TJ}\right)}}{\sqrt{1,40 \frac{P}{D}}} v_0 \quad (5-86)$$

• **Propeller mit Düse**

$$K_{T,DPJ} = 0,67 \frac{P}{D} - 0,77 J \quad (5-87)$$

induzierte Anfangsstrahlgeschwindigkeit v_{0J} [m/s] eines Propellers mit Düse bei beliebiger Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s \neq 0$

$$v_{0J} = \frac{J + \sqrt{\left(J^2 + 5,10 K_{T,DPJ}\right)}}{\sqrt{3,41 \frac{P}{D}}} v_0 \quad (5-88)$$

$$J = \frac{v_A}{n_{\text{nenn}} D} = \frac{v_s (1-w)}{n_{\text{nenn}} D} \quad (5-89)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m]

J Propellerfortschrittsgrad [-]

$K_{T,DPJ}$ Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J \neq 0$ [-]

K_{TJ} Schubbeiwert eines Propellers ohne Düse für $J \neq 0$ [-]

n_{nenn} Nenndrehzahl des Propellers [1/s]

P Konstruktionssteigung [m]

P/D Konstruktionssteigungsverhältnis [-]

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

v_A Anströmungsgeschwindigkeit des Propellers [m/s]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$ [m/s]

v_{0J} induzierte Anfangsgeschwindigkeit des Propellerstrahls bei $J \neq 0$ [m/s] (relativ zum Schiff)

w Nachstromziffer [-]
 $w \approx 0,3$

Bei hinreichender Geometrieinformation können für Propeller mit und ohne Düse auch Berechnungsprogramme eingesetzt werden (z. B. /DVPFIX 2002/; /PROFIX 2002/).

5.6.3 Strahlausbreitungscharakteristik

5.6.3.1 Standardsituationen zur Strahlausbreitung

Die Strahlgeometrie ist wesentlich von folgenden Randbedingungen abhängig:

- Ruderanordnung am Schiff
- Beschränkung des Ausbreitungsraums durch Kaiwände seitlich des Schiffes und in Fortschrittsrichtung der Strahlausbreitung

Diese Randbedingungen werden mit den im Folgenden beschriebenen Standardsituationen erfasst (s. Bild 5.26).

• Standardsituation 1 (keine Strahlteilung)

Schraube ohne nachgeordnetes Zentralruder; Begrenzung des Strahls durch die Wassertiefe, aber keine seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung sowie Schrauben die eine Düse mit nachgeordnetem Zentralruder besitzen.

Die Strahlausbreitung erfolgt

- für Propeller ohne Düse mit der Ablenkung der Strahlachse zur Sohle von ca. $\alpha_0 = 2,5^\circ$,
- für Propeller mit Düse und bei Schiffen mit Tunnelheck mit der Ablenkung der Strahlachse zur Sohle von ca. $\alpha_0 = 0^\circ$ und
- in allen Fällen mit dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 13^\circ$ in Bezug zur Strahlachse.

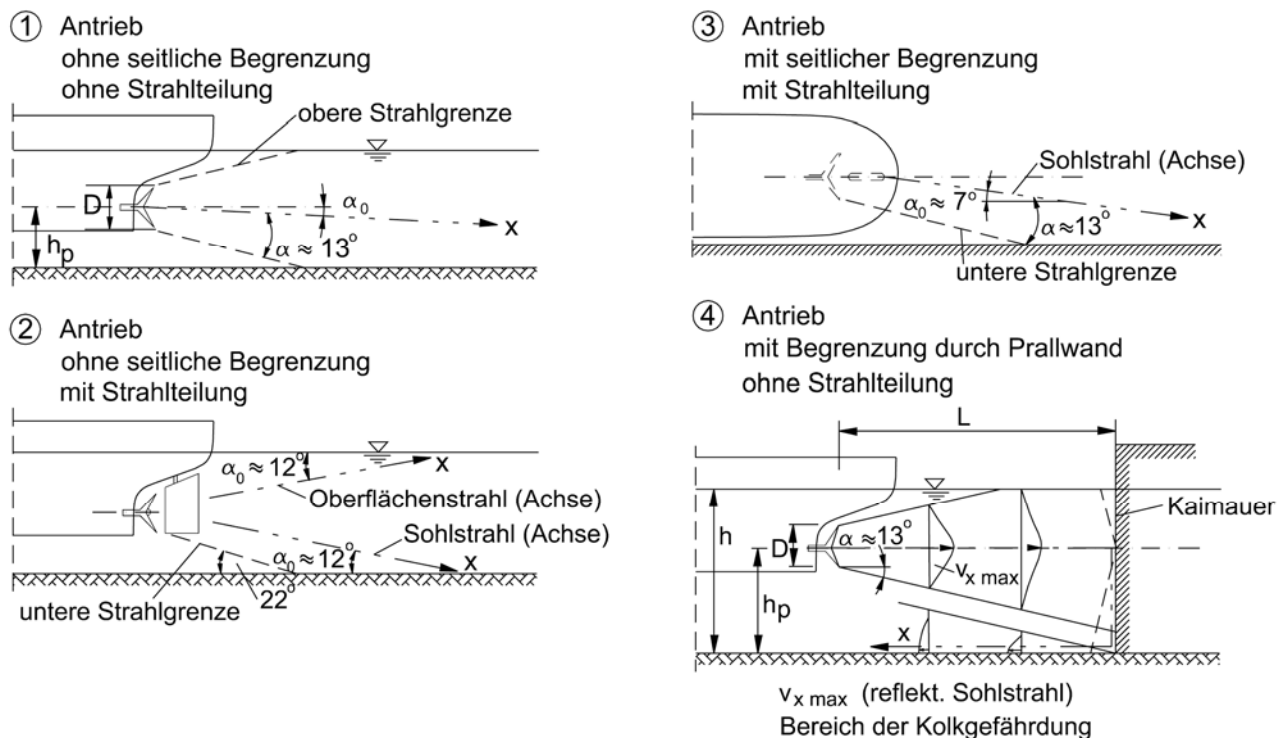


Bild 5.26 Standardsituationen der Strahlausbreitung

Für die Zunahme des Strahlkegeldurchmessers gilt:

Zunahme des Strahlkegeldurchmessers d_x [m]

$$d_x = D + 2x \tan \alpha \quad (5-90)$$

mit

x Entfernung von der Propellerebene [m]

α äußerer Strahlbegrenzungswinkel [°]

Bei Schrauben mit Düse und nachgeordnetem Zentralruder findet keine Strahlteilung statt. Es gilt Standardsituation 1.

- **Standardsituation 2 (Strahlteilung)**

Schraube ohne Düse mit nachgeordnetem Zentralruder; Beschränkung der Strahlausbreitung durch die Wassertiefe, aber keine seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung

Es tritt eine drallbedingte Strahlaufteilung am Ruder in einen Sohl- und einen Oberflächenstrahl auf, wobei der Sohlstrahl die maßgebenden hydromechanischen Belastungen bewirkt. Die Strahlausbreitung erfolgt mit

- einer Ablenkung der Strahlachsen der beiden Teilstrahlen zur Sohle bzw. zur Wasseroberfläche von jeweils ca. $\alpha_0 = 12^\circ$
- dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 10^\circ$ gegen die beiden Strahlachsen zur Sohle und zur Gewässer Oberfläche (entspr. einem Winkel von 22° zw. Strahlbegrenzung und Sohle bzw. Wasseroberfläche)

- **Standardsituation 3 (Strahlteilung)**

Schraube ohne Düse mit nachgeordnetem Zentralruder; zusätzliche seitliche Begrenzung der Strahlausbreitung (durch Kaiwand)

Beim Ablegen von senkrechten Wänden findet eine Strahlteilung bei gleichzeitiger Strahlablenkung zur seitlichen Begrenzung hin statt. Die Sohlstrahlausbreitung erfolgt mit

- der seitlichen Ablenkung der Strahlachse in Richtung Kaiwand von ca. $\alpha_0 = 7^\circ$ (horizontal)
- den äußeren Strahlbegrenzungswinkeln von ca. $\alpha = 13^\circ$ horizontal, ca. $\alpha = 12^\circ$ vertikal

- **Standardsituation 4 (keine Strahlteilung)**

Schraube mit Düse (auch mit Zentralruder) oder Schraube ohne Düse ohne nachgeordnetes Zentralruder; vertikale Begrenzung der Strahlausbreitung in Strahlfortschrittsrichtung (z. B. durch eine Kaimauer)

An der Prallwand findet eine Umlenkung zu den Seiten und zur Sohle sowie eine weitere Umlenkung als reflektierter Sohlstrahl statt. Die Strahlausbreitung erfolgt

- ohne Ablenkung der Strahlachse zur Sohle (ca. $\alpha_0 = 0$)
- mit dem äußeren Strahlbegrenzungswinkel von ca. $\alpha = 13^\circ$
- mit äußeren Strahlbegrenzungswinkeln der umgelenkten Strahlen und des reflektierten Sohlstrahls von ca. $\alpha = 13^\circ$

• Sonstige Situationen

Nicht alle Belastungssituationen können den vorgenannten Standardsituationen zugeordnet werden. Zwischensituationen können durch geeignete Parameterwahl erfasst werden.

5.6.3.2 Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit

Charakteristische Größe für den Propellerstrahl ist die Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}$, die sich entlang der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene einstellt. Sie wird benötigt, um das die Fahrwasserberandungen belastende vollständige dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld zu errechnen

- unter Bezug auf die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 (s. 5.6.1) oder v_{0J} (s. 5.6.2),
- aus der relativen Abnahme der Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}/v_0 = \text{Fkt.}(x/D)$ und
- in Verbindung mit der nach dem Normalverteilungsgesetz anzusetzenden radialen Geschwindigkeitsverteilung (s. 5.6.3.3) und der jeweiligen "Standardsituation" der Strahlausbreitung (s. 5.6.3.1).

Im Falle einer Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s > 0$ ist in den folgenden Gl.n (5-91), (5-92), (5-94) und (5-97) die Bezugsgeschwindigkeit v_0 durch v_{0J} (vgl. 5.6.2) zu ersetzen.

Die Abnahme der Zentralgeschwindigkeit lässt sich in drei Bereiche gliedern (vgl. Bild 5.27):

- (1) Zentralgeschwindigkeit im Anlaufbereich (Ausdehnung $x/D \leq 2,6$ ab Propellerebene) für alle Standardsituationen

Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}$ im Anlaufbereich [m/s]

$$\frac{v_{x,max}}{v_0} = 1$$

(5-91)

- (2) Bereich der von Wasserspiegel, Sohle und seitlichen Begrenzungen nicht behinderten Strahlausbreitung ($2,6 < x/D \leq x_{gr}/D$) für alle Standardsituationen

Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}$ bei nicht behinderter Strahlausbreitung [m/s]

$$\frac{v_{x,max}}{v_0} = 2,6 \left(\frac{x}{D} \right)^{-1}$$

(5-92)

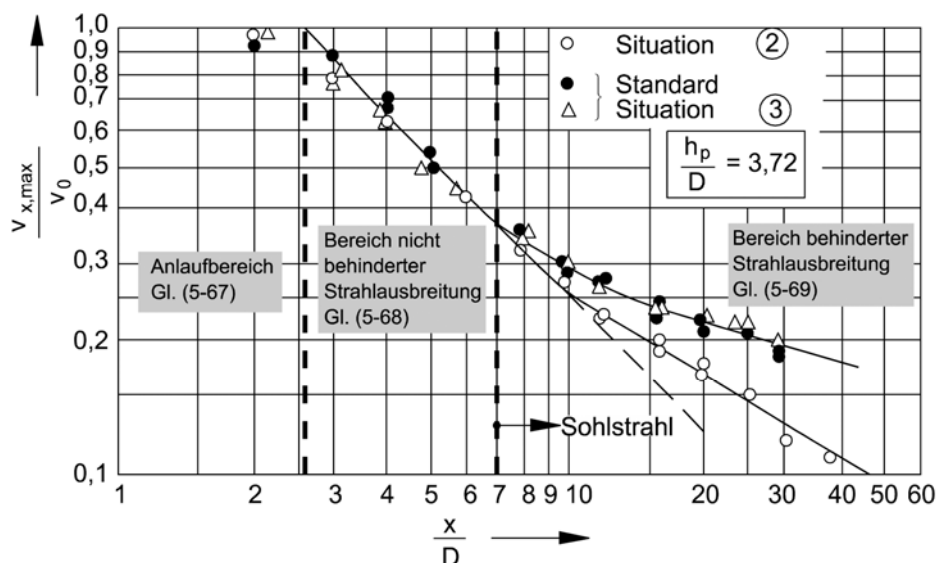


Bild 5.27 Abnahmecharakteristik der Zentralgeschwindigkeit $v_{x,max}$ über die Entfernung x von der Propellerebene, aufgetragen über dimensionslose Größen und verglichen mit Messwerten für $h_p/D = 3,72$

In der Entfernung x_{gr} hinter der Propellerebene liegt die Stelle, ab der die Strahlausbreitung durch die Sohle behindert ist. Es gilt

$$\frac{x_{gr}}{D} = \left(\frac{A}{2,6} \right)^{\frac{1}{a-1}} \quad (5-93)$$

mit

a, A von der "Standardsituation" des Strahlausbreitungsraums, der Hinterschiffsausbildung sowie der Propeller- und Ruderanordnung abhängige Größen [-], s. u. (3)

D Propellerdurchmesser [m]

x_{gr} Entfernung, ab der die Strahlausbreitung behindert wird [m]

(3) Bereich der durch Wasserspiegel, Sohle und seitliche Begrenzungen beeinflussten Strahlausbreitung ($x/D > x_{gr}/D$)

Zentralgeschwindigkeit $v_{x\max}$ bei behinderter Strahlausbreitung [m/s]

$$\frac{v_{x\max}}{v_0} = A \left(\frac{x}{D} \right)^{-a} \quad (5-94)$$

mit

a, A von der "Standardsituation" des Strahlausbreitungsraums, der Hinterschiffsausbildung sowie der Propeller- und Ruderanordnung abhängige Größen [-]

Für den Exponenten a gilt je nach Standardsituation:

$a = 0,6$ bei Begrenzung durch Sohle und Wasserspiegel (Standardsituation 1, Standardsituation 2 (Sohlstrahl) und Standardsituation 4 für $x \leq L$ (Anströmbereich bis zur Kaiwand))

$a = 0,3$ bei Begrenzung durch zusätzliche seitliche Wand (Standardsituationen 3 und 4) für $L < x \leq L + h_p$

$a = 0,25$ für die Strahlausbreitung hinter einem Zweischaubenantrieb (nur dann, wenn er wie ein Einschrauber behandelt wird)

$a = 1,62$ für die Strahlausbreitung des reflektierten Sohlstrahls vor einer Kaiwand (Standardsituation 4, für $x > L + h_p$ (Umlenkbereich ab Kaiwand))

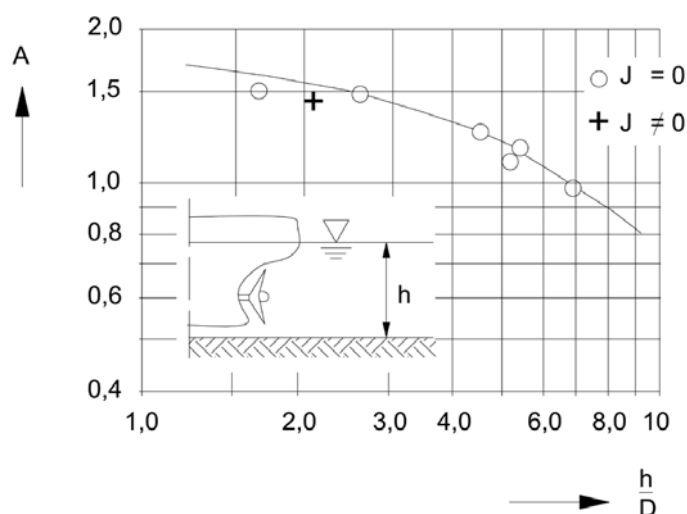


Bild 5.28 Beiwert $A = Fkt.(h/D)$ (Standardsituation 1)

Für den Beiwert A gilt:

- (1) Bei nur durch Sohle und Wasserspiegel begrenzter Strahlausbreitung hinter einem Propeller ohne Strahlteilung, d. h. für Propeller ohne nachgeordnetes Zentralruder bzw. für Propeller mit Düse (in diesem Fall auch mit nachgeordnetem Zentralruder) für $1,0 \leq h/D \leq 9$
(Standardsituation 1, s. Bild 5.28):

$$A = 1,88 e^{-0,092 (h/D)} \quad (5-95)$$

mit

h Wassertiefe [m]

- (2) Bei Strahlteilung durch ein dem Propeller nachgeordnetes Zentralruder ($0,7 \leq h_p/D \leq 5$)
(Standardsituationen 2 und 3, s. Bild 5.29):

$$A = 1,88 e^{-0,061 (h_p/D)} \quad (5-96)$$

mit

h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle [m]

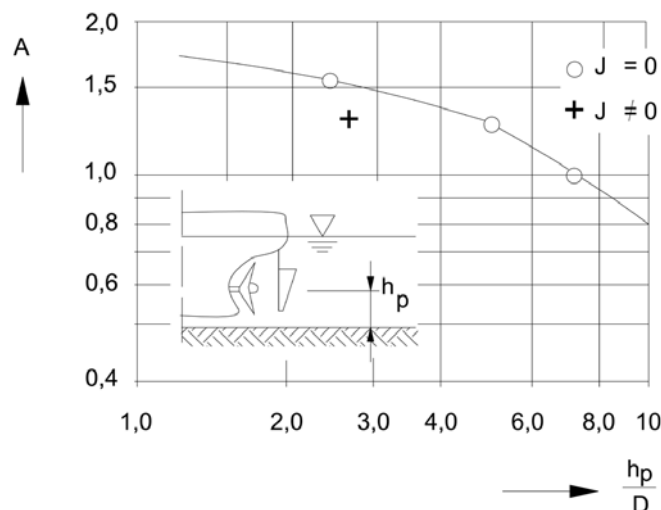


Bild 5.29 Beiwert $A = \text{Fkt.}(h_p/D)$ (Standardsituation 2)

- (3) Bei Zweischraubenantrieb näherungsweise $A = 0,9 = \text{konst.}$ bei Berechnung wie Einschrauber (gegenseitige Strahlbeeinflussung überwiegt gegenüber dem Wassertiefeneinfluss).
(4) Bei Begrenzung des Ausbreitungsraums durch eine in Strahlfortschrittsrichtung liegende Prallwand (für den reflektierten Sohl- und Wandstrahl, $x \geq L + h_p$)
(Standardsituation 4, s. Bild 5.30):

$$A = \left(\frac{v_{x \max}(L)}{v_0} \right) \left(\frac{L + h_p}{D} \right)^{1,62} \quad (5-97)$$

mit

h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle (Laufänge des an der Wand nach unten umgelenkten Strahls bis zur Sohle) [m]

L Abstand Prallwand - Propellerebene [m]

D Propellerdurchmesser [m]

$v_{x \max}(L)$ Zentralgeschwindigkeit im Abstand L hinter der Propellerebene [m/s]

Als für die Kolkbildung am Fuß der Kaiwand maßgebende Strahlgeschwindigkeit wird dabei die an der Stelle $x = L$ auftretende Geschwindigkeit angesetzt (s. Bild 5.30).

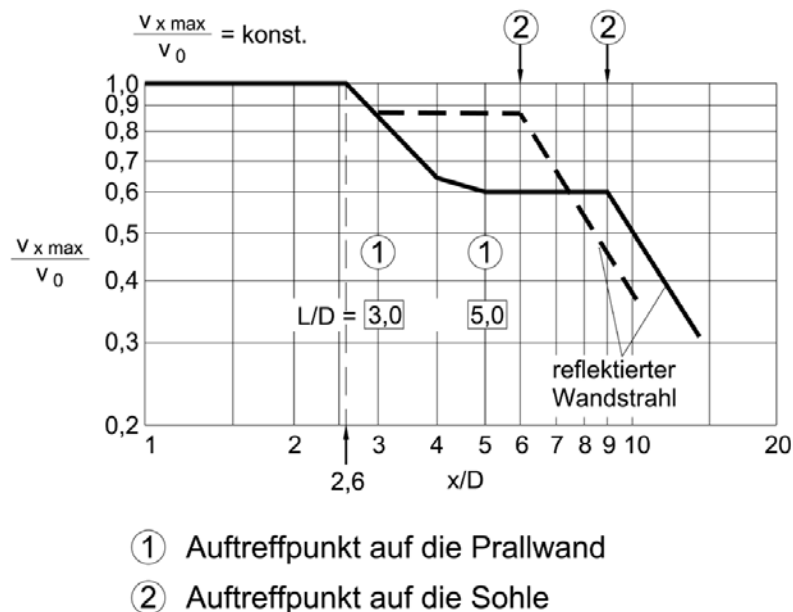


Bild 5.30 Strahlausbreitungscharakteristik des Zweischaubenantriebs eines Seeschiffs bei Reflexion an einer Prallwand bei Prallabständen $L/D = 3,0$ und $5,0$ (Standardsituation 4) /Römisch 1975/

5.6.3.3 Berechnung der Strahlgeschwindigkeitsverteilung quer zur Strahlachse

Die Strahlgeschwindigkeitsverteilung v_{xr} quer zur Strahlachse im Strahlauftrittsbereich folgt, ausgehend von

- der Strahlachsenlage über bzw. an der Sohle in der Entfernung x von der Propellerebene (s. 5.6.3.1) und
- der Zentralgeschwindigkeit $v_{x\max}$

Beachte: Berechnung von $v_{x\max}$ in den Gl.n (5-91), (5-92) und (5-94) mit

→ v_0 wenn $v_S = 0$ bzw. $J = 0$

→ v_{0J} wenn $v_S \neq 0$ bzw. $J \neq 0$

über die radiale Geschwindigkeitsverteilung:

$$\frac{v_{xr}}{v_{x\max}} = e^{-22,2 (r_x/x)^2} \quad (5-98)$$

mit

r_x radialer Abstand des betrachteten Punktes, z. B. der Sohle, von der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene [m]

v_{xr} Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Radius r_x [m/s]

Die Strahlgeschwindigkeit v_{xr1} an der Sohle bzw. am Ufer unter Berücksichtigung der Schiffsgeschwindigkeit ergibt sich näherungsweise wie folgt:

$$v_{xr1} \approx v_{xr} \left(1 - \frac{v_S}{v_{0J}} \right) \quad (5-99)$$

mit

v_{xr} Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Radius r_x [m/s]

- v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]
 ggf. vorzeichenbehaftet einsetzen: v_s ist negativ, wenn Schiffsbewegung und Propellerstrahl in die gleiche Richtung zeigen, z. B. bei einem Stoppvorgang
- v_{0J} induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J > 0$ [m/s]

Für die Belastung einer ebenen Gewässersohle ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen r_x , x und h_p (vgl. Bild 5.31):

$$r_x = (h_p - x \sin \alpha_0) / \cos \alpha_0 \quad (5-100)$$

$$x_s = x \cos \alpha_0 - r_x \sin \alpha_0 \quad (5-101)$$

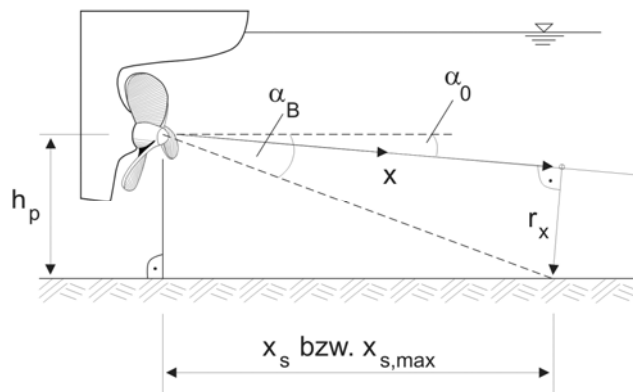


Bild 5.31 Geometrische Definitionen zur Berechnung der Sohlgeschwindigkeitsverteilungen quer zur Strahlachse

Die mit den Gl.n (5-98) bis (5-101) berechnete Sohlgeschwindigkeit steigt zunächst in x -Richtung an und fällt dann wieder ab. Das Maximum der Sohlgeschwindigkeit v_{xr} wird für die Steinbemessung als v_{Bmax} bezeichnet. Für Übersichtsrechnungen ergibt sich die Lage dieses Maximums aus folgender Gleichung:

$$x_{s,max} = \frac{h_p}{\tan \alpha_B} \quad (5-102)$$

mit

h_p Höhe Propellerachse über Sohle [m]

$x_{s,max}$ Lage der maximalen Sohlgeschwindigkeit hinter dem Drehpunkt der Propellerebene [m]

α_B durchschnittlicher Ablenkungswinkel

$\alpha_B = 8,5^\circ$ für die Standardsituationen 1 bzw. 4 bei $x_{s,max} < L$

$\alpha_B = 13^\circ$ für die Standardsituationen 2 bzw. 3 (s. 5.6.3.1)

Der Einfluss des Propellerfortschrittsgrades auf v_0 und damit auf v_{xmax} und v_{Bmax} wurde mit den Gl.n (5-85) bis (5-89) bereits berücksichtigt. Der Propellerfortschrittsgrad beeinflusst aber auch die Auftreffgeschwindigkeit auf die Sohle, die mit Gl. (5-104) näherungsweise erfasst wird.

Für die Belastung einer in Strahlrichtung ansteigenden Uferböschung können die in 5.6.3.1 genannten Standardsituationen hinsichtlich der Strahlausbreitungscharakteristik sinngemäß angewendet werden. Das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle bzw. der Uferböschung muss durch Anwendung der Gl. (5-98) unter Beachtung der geometrischen Randbedingungen nach Bild 5.32, Bild 6.1 und Gl. (6-4) gefunden werden. Hierbei ist eine sinnvolle Annahme des größten Winkels zwischen Schiffsachse und Uferlinie zu treffen. Große Winkel treten z. B. bei Kurvenfahrt auf.

Bei einem Ablegemanöver entsteht der Strahlangriff auf die Uferböschung durch Umlenkung des Strahls an den Rudern. Der für die Bemessung relevante kleinste Wert des Winkels β_{st} zwischen Böschungsnormale und umgelenkter Strahlachse (s. Bild 6.1) kann dabei 15° betragen. Durch die Umlenkung wird die Strahlgeschwindigkeit auf ca. 85 % des Ausgangswertes am Propeller reduziert.

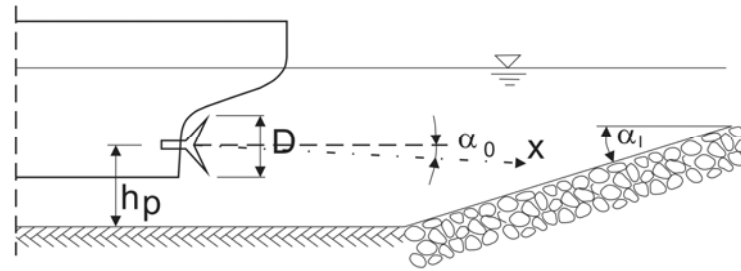


Bild 5.32 Prinzipskizze zum Strahlgriff auf geböschtes Ufer (Längsneigungswinkel α_1 s. auch 6.3.1)

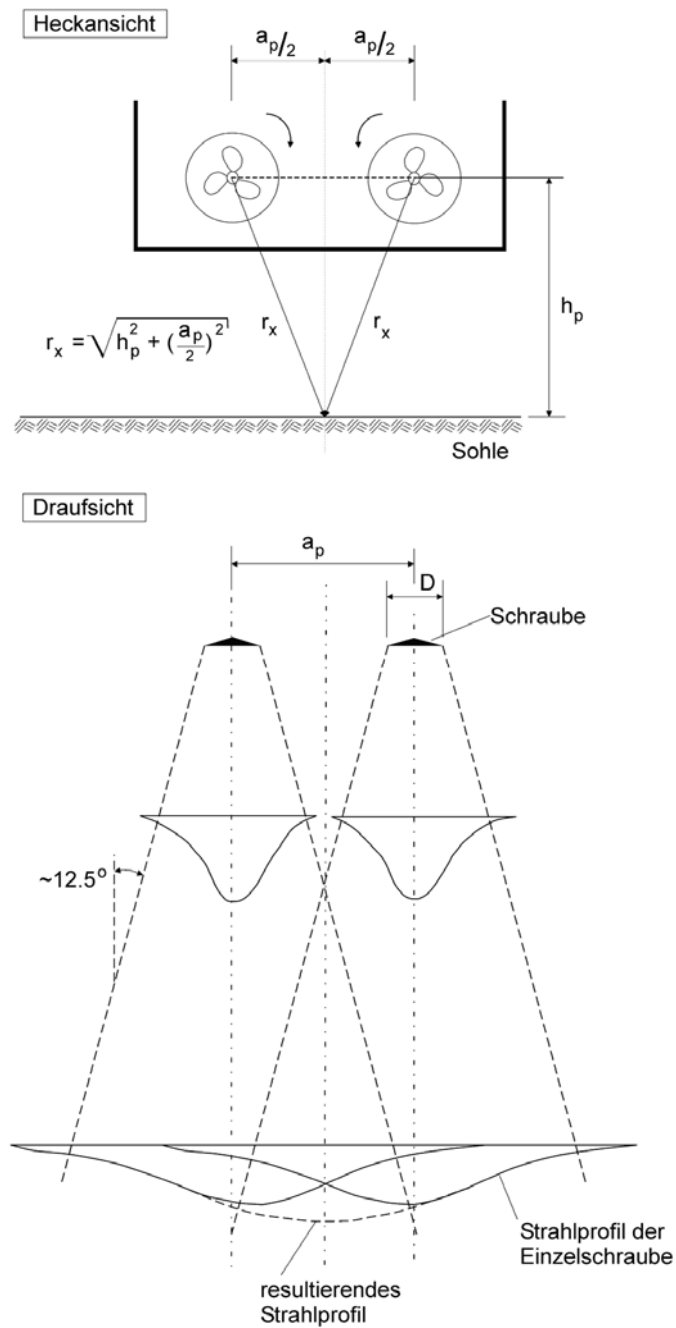


Bild 5.33 Heckansicht eines Zweischaubers mit Überlagerungsbereich der beiden Teilstrahlen für Standardsituation 1, $\alpha_0 = 0^\circ$

5.6.3.4 Mehrschraubenantriebe

Bei Mehrschraubenantrieben ist nach /Römisch 1994/ zunächst die Strahlausbreitung der einzelnen Schiffschrauben mit den in Kap. 5.6.1 - 5.6.3.3 genannten Algorithmen separat zu untersuchen. Dabei ist der Parameter a so zu wählen, als ob zwei einzelne Einschrauber vorlägen ($a \neq 0,25$). Um das Zusammenwirken der Teilantriebe zu erfassen, können die v_{xr} -Werte näherungsweise addiert werden. Für $\alpha_0 = 0^\circ$ in der Standard-situation 1 ergeben sich dabei die in Bild 5.33 dargestellten geometrischen Randbedingungen.

Für $\alpha_0 \neq 0^\circ$, bei einer seitlichen Strahlausbreitung oder für einen schrägen Strahlangriff auf das Ufer empfiehlt sich für eine sinngemäße Überlagerung der Teilstrahlen eine Skizze mit allen relevanten geometrischen Abmessungen.

Größere Werte der Strahlgeschwindigkeit an der Sohle als nach der Addition können sich ergeben, wenn die Propeller eines Zweischaubers gegeneinander zur Mitte hin schlagen, so wie in Bild 5.33 angedeutet.

Hinweis: Ein verallgemeinerter Berechnungsansatz für Strahlüberlagerungen ist in **Anhang E** angegeben. Näherungsweise können Mehrschraubenantriebe mit Parametern, die unter Gl. (5-94) genannt sind ($a = 0,25$ und $A = 0,9$) auch wie Einschrauber behandelt werden.

5.6.4 Vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit

Für Ein- und Mehrschrauber in einigen unten genannten Fällen wird im Folgenden eine vereinfachte Berechnung der maximalen Sohlgeschwindigkeit für Propellerfortschrittsgrade $J = 0$ und $J \neq 0$ angegeben. Sie kann nur für Fälle ohne Strahlüberlagerung angewendet werden.

- **Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s = 0$**

Die maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls v_{Bmax} kann für die Standard-situationen 1, 2 und 3 der Strahlausbreitung (s. 5.6.3.1) näherungsweise für $J = 0$ wie folgt abgeschätzt werden:

maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt v_{Bmax} für $J = 0$ (vereinfachte Berechnung) [m/s]

$$v_{Bmax} = E \left(\frac{D}{h_p} \right) v_0 \quad (5-103)$$

mit

D Propellerdurchmesser [m]

h_p Höhenlage der Propellerachse über der Sohle [m]

E Beiwert zur Charakterisierung von Heckform und Ruderanordnung [-] (s. Bild 5.34)

$E = 0,71$ für schlanke Heckformen mit Zentralruder

$E = 0,42$ für schlanke Heckformen ohne Zentralruder

$E = 0,25$ für moderne Binnenschiffe mit Tunnelheck und Zwillingsruder

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$ [m/s] s. 5.6.1

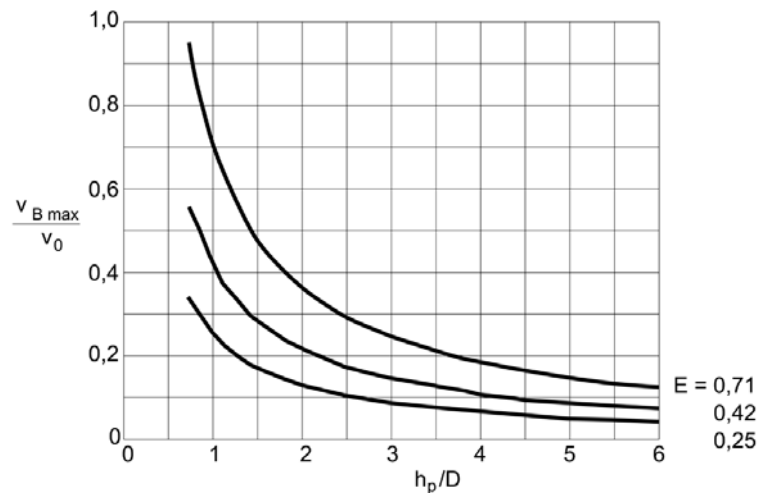


Bild 5.34 Veränderung der relativen maximalen Sohlgeschwindigkeit des Propellerstrahls $v_{Bmax} / v_0 = Fkt. (h_p/D, E)$

• Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser $v_s \neq 0$

Mit Fahraufnahme des Schiffes, d. h. wachsendem Propellerfortschrittsgrad, verringern sich die induzierte Anfangsgeschwindigkeit relativ zur Sohle bzw. zum Ufer und damit die entsprechende Auftreffgeschwindigkeit des Propellerstrahls auf die Fahrwasserberandungen.

Die maximale Sohlgeschwindigkeit v_{Bmax1} bei dem Propellerfortschrittsgrad $J \neq 0$ errechnet sich in diesem Fall näherungsweise nach

maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt v_{Bmax1} für $J \neq 0$ (vereinfachte Berechnung) [m/s]

$$v_{Bmax1} = v_{Bmax} \left(1 - \frac{v_s}{v_{0J}} \right) \quad (5-104)$$

mit

v_{Bmax} maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt [m/s] bei $v_s = 0$ bzw. $J = 0$ (vereinfachte Berechnung)

v_{Bmax1} maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt [m/s] bei $v_s \neq 0$ bzw. $J \neq 0$

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

ggf. vorzeichenbehaftet einsetzen: v_s ist negativ, wenn Schiffsbewegung und Propellerstrahl in die gleiche Richtung zeigen, z. B. bei einem Stoppvorgang

v_{0J} induzierte Anfangsgeschwindigkeit [m/s] bei $J > 0$, nach 5.6.2

Bei beengten Fahrwasserverhältnissen (z. B. bei Schleusenausfahrten) sind die o. g. Sohlgeschwindigkeitsreduktionen wegen der infolge der starken Fahrwasserbegrenzung erreichbaren, nur sehr geringen Schiffsgeschwindigkeiten vernachlässigbar und die Belastungsverhältnisse wie bei $J = 0$ anzusetzen.

5.6.5 Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes

Die maßgebende Strömungsgeschwindigkeit in Sohlhöhe für die Bemessung des Deckschichtmaterials der Sohlensicherung setzt sich bei einem fahrenden Schiff zusätzlich zur Propulsionsstrahlgeschwindigkeit aus der Rückströmung, der Nachlaufströmung und der Grundströmung im Kanal/Fluss zusammen. Hierbei ist zu beachten,

- dass in Sohlhöhe eine geringere Strömungsgeschwindigkeit herrscht,
- dass die Rückströmung durch den Rumpf des Schiffes unter dem Schiff behindert sein kann und
- dass sogar die Nachlaufströmung (vom Schiff in Fahrtrichtung mitgenommenes Wasser) entgegen der Propulsionsströmung wirken kann.

Somit errechnet sich die bemessungsrelevante Strömungsgeschwindigkeit $v_{\max,S}$ an der Sohle im Sonderfall paralleler Strömung zum Schiffspfad für die Berg- und Talfahrt wie folgt:

$$v_{\max,S,Berg} = v_{\max,S} + v_{fl,bem} + v_{Nach,bem} \quad (5-105)$$

$$v_{\max,S,Tal} = v_{\max,S} - v_{fl,bem} - v_{Nach,bem} \quad (5-106)$$

mit

$v_{\max,S,Berg}$ Bemessungsrelevante Strömungsgeschwindigkeit [m/s] an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes bei der Bergfahrt

$v_{\max,S,Tal}$ Bemessungsrelevante Strömungsgeschwindigkeit [m/s] an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes bei der Talfahrt

$v_{\max,S}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s] an der Sohle ohne Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes

$v_{\max,S} = v_{xr}$ bzw. v_{xr1} nach exakter Berechnung, s. 5.6.3.3

$v_{\max,S} = v_{Bmax}$ bzw. v_{Bmax1} nach vereinfachter Berechnung, s. 5.6.4

$v_{fl,bem}$ Fließgeschwindigkeit [m/s] in Sohl- bzw. Deckwerksnähe im Grenzschichtabstand des Schraubenstrahls vom Deckwerk gemäß Gl. (5-107)

$v_{Nach,bem}$ Nachlaufströmung [m/s] in Sohlhöhe gemäß Gl. (5-108)

Die Fließgeschwindigkeit in Sohl- bzw. Deckwerksnähe $v_{fl,bem}$ ist im Grenzschichtabstand δ_G des Schraubenstrahls vom Deckwerk zu bestimmen. Näherungsweise kann hierbei von $\delta_G = 1$ m ausgegangen werden. Bei Annahme eines 1/7-Potenzgesetzes für die vertikale Fließgeschwindigkeitsverteilung gilt für die Fließgeschwindigkeit in Sohlhöhe, d.h. im Grenzschichtabstand δ_G ,

$$v_{fl,bem} \approx v_m \frac{8}{7} \left(\frac{\delta_G}{h} \right)^{1/7} \leq v_m \quad (5-107)$$

mit

$v_{fl,bem}$ Fließgeschwindigkeit [m/s] in Sohl- bzw. Deckwerksnähe

v_m mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s] als Tiefenmittel im Schiffspfad

δ_G Grenzschichtabstand [m]

h mittlere Wassertiefe [m] im Gewässer

Hinweis: Das 1/7-Potenzgesetz kann für Sohlen bzw. Ufer aus Kies bis Deckwerkssteinen angewendet werden.

Die Nachlaufströmung $v_{Nach,Bem}$ in Sohlhöhe kann nach /Maynord 2004/ wie folgt abgeschätzt werden:

$$v_{Nach,Bem} = -0,78 \left(\frac{h}{T} \right)^{-1,81} v_s \quad (5-108)$$

mit

$v_{Nach,Bem}$ Geschwindigkeit der Nachlaufströmung [m/s] in Sohlhöhe

T Tiefgang [m]

v_s Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser [m/s]

Es ist zu beachten, dass diese Formel den Maximalwert hinter dem Schiff angibt. Dieser muss allerdings nicht an derselben Stelle wie die maximale Propellerstrahlgeschwindigkeit auftreten. Streng genommen müsste deshalb die Verteilung der Nachlaufströmungsgeschwindigkeit hinter dem Schiff betrachtet werden. Für eine Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit $v_{\max,S}$ an der Sohle wird die obige Formel jedoch als ausreichend erachtet.

5.6.6 Belastung durch Bugstrahlruder

Nach /Schokking 2002/ treten bemessungsrelevante Deckwerksschäden durch Bugstrahlrudereinsatz im Bereich von Anlegestellen auf. Die Schiffsgeschwindigkeit ist hier vernachlässigbar klein, nachfolgend wird deshalb von $v_s = 0$ ausgegangen. Nach Modelluntersuchungen gelten die nachfolgend genannten Gleichungen näherungsweise auch für Schiffsgeschwindigkeiten bis etwa 5 km/h. Es wird unterschieden zwischen kurzzeitiger Belastung durch ein Anlegemanöver und Dauerbeanspruchung sowie der Belastung eines geböschten Ufers (Böschungswinkel $< 45^\circ$) und der Sohle vor einem senkrechten Ufer (Kaimauer), siehe Bild 5.35. Diese Belastung ist während der Fahrt ($v_s \neq 0$) i. d. R. nicht bemessungsrelevant, da der Strahl dann umgelenkt wird.

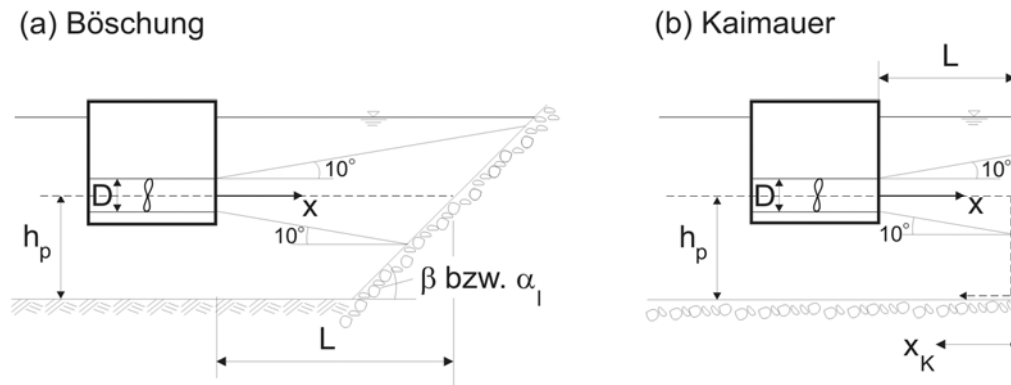


Bild 5.35 Strahlausbreitung bei Belastung durch Bugstrahlruder; a) geböschtes Ufer, b) Kaimauer mit Strahlumlenkung zur Sohle

β = Böschungswinkel

α_l = Längsneigungswinkel s. Bild 6.1 und Gl. (6-4)

Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 entspricht in etwa der eines Düsenpropellers mit dem Propellerfortschrittsgrad $J = 0$. Es gilt nach /EAU 2004/; /Blaauw, Kaa 1978/ abhängig von der **Leistung**

$$v_0 \approx 1,1 \left(\frac{P_{\text{Bug}}}{\rho_w D^2} \right)^{1/3} \quad (5-109)$$

mit

P_{Bug} installierte Maschinenleistung des Bugstrahlruders [W] s. Tabelle 5.1

Beachte: in Tabelle 5.1 in [kW]

D Rohrdurchmesser \approx Propellerdurchmesser des Bugstrahlruders [m]

ρ_w Dichte des Wassers [kg/m³]

bzw. mit Gl. (5-80), abhängig vom **Schubbeiwert**

$$v_0 = 1,13 f_N n_{\text{Nenn}} D \sqrt{K_{T,DP}} \quad (5-110)$$

mit

f_N Faktor zur einsetzbaren Propellerdrehzahl [-]

Empfehlung nach /EAU 2004/:

$f_N \approx 0,75$ für Anfahrmanöver aus dem Stand

$K_{T,DP}$ Schubbeiwert eines ummantelten Propellers [-] für $J = 0$ wie bei Gl. (5-80)

n_{Nenn} Nenndrehzahl des Propellers [1/s], s. Tabelle 5.1

Beachte: in Tabelle 5.1 in [1/min]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$ [m/s]

Die Abnahme der induzierten Anfangsgeschwindigkeit ist beim Bugstrahlruder geringer als bei freien Propellern. Aus Messwerten von /Schokking 2002/ gilt für die maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit (Zentralgeschwindigkeit) $v_{x\max}$ an einem geböschten Ufer:

 maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit eines Bugstrahlruders an einem geböschten Ufer $v_{x\max}$ [m/s]

$$\left\{ \begin{array}{ll} v_{x\max} = v_0 & \text{für } \frac{x}{D} \leq 1,0 \\ v_{x\max} = v_0 \left(\frac{x}{D} \right)^{-1/3} & \text{für } \frac{x}{D} > 1,0 \end{array} \right\} \quad (5-111)$$

mit

D Rohrdurchmesser \approx Propellerdurchmesser [m]

$v_{x\max}$ maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit, Zentralgeschwindigkeit [m/s]

v_0 induzierte Anfangsgeschwindigkeit [m/s]

x Entfernung von der Austrittsseite des Bugstrahlruders [m]

Der Bemessungswert tritt für $x = L$ an der Böschung auf.

Am Fuß einer Kaimauer beträgt der Größtwert der Strahlgeschwindigkeit an der Sohle $v_{\max,S,K}$ /Blokland 1994/:

$$\left\{ \begin{array}{ll} v_{\max,S,K} = 1,0 \frac{v_0 D}{h_p} & \text{für } \frac{L}{h_p} < 1,8 \\ v_{\max,S,K} = 2,8 \frac{v_0 D}{L + h_p} & \text{für } \frac{L}{h_p} \geq 1,8 \end{array} \right\} \quad (5-112)$$

mit

h_p Höhenlage der Achse des Bugstrahlruders über der Sohle [m]

L Abstand Austrittsfläche Bugstrahlruder - Kaimauer [m]

$v_{\max,S,K}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle am Fuß der Kaimauer [m/s]

Die weitere Abnahme des Strahls an der Sohle $v_{\max,S,xK}$ nach Umlenkung kann analog zum Propellerstrahl des Hauptantriebs wie folgt in Abhängigkeit vom Abstand x_K von der Kaimauer errechnet werden:

$$v_{\max,S,xK} = v_{\max,S,K} \left(\frac{L + h_p}{x} \right)^{1,62} \quad (5-113)$$

mit

x Entfernung entlang der Strahlachse ab Düsenaustritt über Kaimauer und Sohle [m]
 $x = L + h_p + x_K$

x_K Abstand des umgelenkten Strahls auf der Sohle ab Kaimauer [m]

$v_{\max,S,xK}$ veränderte maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle nach der Umlenkung im Abstand x_K von der Kaimauer [m/s]

Die Ermittlung der erforderlichen Steingröße eines unverklammerten Deckwerks erfolgt nach Kap. 6.3. Die Berücksichtigung eines Teilvergusses wird unter Kap. 8 angesprochen.

5.7 Wellen allgemein, Wellenverformung und Wasserstände

- **Windwellen und Windstau**

Zusätzlich zu den schiffserzeugten Wellen können auf Gewässern Wellen infolge Wind entstehen. Deren Höhe und Länge ist von Windrichtung, -geschwindigkeit und -dauer abhängig. In Einzelfällen kann deren Kombination mit anderen Wellen zu berücksichtigen sein. Dies ist z. B. bei Gewässern in großen Landflächen (Rheinebene, norddeutsche Tiefebene) und bei langgestreckten, breiten Gewässerabschnitten (Stauhaltungen) zu prüfen. Bei Kanälen sind Windwellen in der Regel zu vernachlässigen, Windstau kann jedoch vor allem in langen Stauhaltungen von Bedeutung sein. Weitere Informationen zu Winddaten, Windwirkgebiet und Mindestwirkdauer, Windstau sowie zu Höhe und Periode der Windwellen sind im GBB 2004 /BAW 2004/ zu finden.

- **Wellenverformung**

Alle in 5.4 – 5.6 ermittelten Wellenhöhen gelten unter der Voraussetzung ungehinderter Ausbreitung. Dies trifft für die meisten Bemessungsfälle zu. In bestimmten Situationen unterliegt die Wellenfront vielen Störungen und Einflüssen (Einbauten, Wassertiefenänderungen, Anlaufwinkel), die die Wellenhöhe verändern. Daher muss dann die Umgebung des zu bemessenden Deckwerks mit ihren möglichen Auswirkungen auf die Wellenhöhe am Bemessungspunkt untersucht werden. Möglich sind Wellenaufsteilen und -brechen, Diffraktion, Refraktion und/oder Reflexion. Weitere Informationen hierzu sind im GBB 2004 /BAW 2004/ nachzulesen.

- **Sonstige Wellen**

Weitere Ursachen von Wasserstandsschwankungen können neben den kurzperiodischen schiffs- und winderzeugten Wellen langperiodische Vorgänge sein. Dazu gehören Schwall- und Sunkwellen, Tidewellen, Hochwasserwellen. Je nach Bemessungssituation und Fragestellung müssen diese Wellen mit denen aus anderen Ursachen (Wind, Schiff) additiv überlagert werden.

6 Hydraulische Bemessung ungebundener Deckschichten aus Wasserbausteinen

6.1 Allgemeines

Der hydraulischen Bemessung von ungebundenen Deckschichten aus Wasserbausteinen sind die Wellen- und/oder Strömungseinwirkungen nach Kap. 4 zu Grunde zu legen.

Aus Erfahrungen und Modellversuchen ist bekannt, dass die Erosionsfestigkeit einer ungebundenen Deckschicht aus Wasserbausteinen gegenüber Wellen- und Strömungseinwirkungen von folgenden Parametern beeinflusst wird:

- Einzelsteingewicht bzw. Einzelsteingröße (Korngröße) und Rohdichte
- Einbaudicke der Steinschüttung

Nachfolgend werden die aus Erfahrungen und Modellversuchen abgeleiteten Bemessungsregeln für unterschiedliche hydraulische Belastungsarten aufgeführt. Die Bemessungsgröße ist die Steingröße D_{50} (Siebdurchmesser der Steine in der Deckschicht bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie) bzw. D_{n50} (nominale Steingröße bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie). Nähere Erläuterungen zu den Steingrößen und deren Umsetzung in standardisierte Steinklassen sind in 6.8 gegeben.

6.2 Steingröße bei Belastung durch Heckquerwellen

Für die Normalfahrt kann der für die Lagestabilität mindestens erforderliche mittlere Steindurchmesser D_{50} des Deckschichtmaterials von Böschungssicherungen für die maximale Höhe aller Heckquerwellen mit folgender Gleichung bemessen werden:

Steingröße D_{50} aus Heckquerwellen [m]

$$D_{50} \geq \frac{H_{\text{Bem}}}{B'_B \left(\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} \right) m^{1/3}} \quad (6-1)$$

mit

B'_B Stabilitätsbeiwert [-],
aus Naturversuchen /BAW 2009/ abgeleitet

$B'_B = 1,5$ (untere Grenze der Messwerte) – $2,3$ (Mittelwert der Messwerte)

Für die Bemessung wird empfohlen:

$B'_B = 1,5$ bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls und/oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen

$B'_B = 2,3$ bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls und/oder wenn ein begrenzter Unterhaltungsaufwand in Kauf genommen wird

D_{50} erforderliche Steingröße (Siebkorndurchmesser) bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie [m]

H_{Bem} Bemessungswellenhöhe [m],
 $H_{\text{Bem}} = \text{MAX} \{ H_{u,\text{Heck}}; H_{u,\text{Heck},\text{StBem}}; H_{\text{Sek},q} \}$

$H_{u,\text{Heck}}$ Heckwellenhöhe des Primärwellensystems nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) sowie Bild 5.12

$H_{u,\text{Heck},\text{StBem}}$ Bemessungswert gemäß Gl. (5-53) in 5.5.5.1 für den Abstandsfall B

$H_{\text{Sek},q}$ reine Heckquerwellenhöhe des Sekundärwellensystems nach 5.5.5.2, Gl. (5-61), begrenzt durch Gl. (5-65)

m Böschungsneigung $m = \cot \beta$ [-], $2 \leq m \leq 5$

Beachte: hier nicht $m_{K,\text{äqui}}$ verwenden, sondern die tatsächliche Böschungsneigung m_{rts} bzw. m_{lks}

β Böschungswinkel [°]

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m³]
 ρ_S Rohdichte der Wasserbausteine [kg/m³]
Beachte: /TLW 2003/

Die Bemessungsformel wurde in Anlehnung an die Hudson-Formel zur Bemessung der Steingrößen bei auflaufenden Wellen entwickelt. Dort beeinflusst die Böschungsneigung sowohl den Brechertyp als auch die Ablaufgeschwindigkeit der Welle, die die größte Belastung ergibt. Für die i. d. R. parallel zum Ufer laufenden Wellen ist der Einfluss $m^{-1/3}$ auf D_{50} , insbesondere bei kleinen, flachen Böschungsneigungen, überschätzt. Gl. (6-1) sollte deshalb nur für technisch hergestellte Böschungen mit Neigungen m von ca. 2 - 5 angewendet werden.

Zur Berücksichtigung des Einflusses des Schüttwinkels des Deckschichtmaterials $\varphi'_{D,hydr}$ und des Böschungswinkels β kann in erster Näherung in Analogie zur Bemessung bei der Wiederauffüllungsströmung angesetzt werden:

$$D_{50} \geq \frac{H_{u,Heck} C_{Bö}}{B_B^* \frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-2)$$

mit

B_B^* Beiwert für Auftrittshäufigkeit [-]

$B_B^* \approx 2,0$ bei häufigem Auftreten des Bemessungsfalls oder wenn Deckwerksschäden möglichst vollständig vermieden werden sollen

$B_B^* \approx 3,0$ bei geringer Häufigkeit des Bemessungsfalls oder wenn begrenzte Unterhaltungsaufwendungen in Kauf genommen werden

$C_{Bö}$ Faktor für Böschungseinfluss [-], Definition unter Gl. (6-8) in 6.6.1,

$H_{u,Heck}$ Heckwellenhöhe [m] nach 5.5.4.4, Gl. (5-32) sowie Bild 5.12 bzw. Sekundärquerwellenhöhe nach 5.5.5.2, Gl. (5-61), begrenzt durch Gl. (5-65) bzw. Bemessungswert $H_{u,Heck,StBem}$ gemäß Gl. (5-53) in 5.5.5.1 für den Abstandsfall B

6.3 Steingröße bei Propulsionsströmung

6.3.1 Steingröße bei Strahlangriff

Zur Gewährleistung der Sohlenstabilität in Manövrierbereichen ohne signifikante Kolkbildung ist der erforderliche mittlere Steindurchmesser D_{50} des Deckschichtmaterials der Sohlensicherung für die maximale Geschwindigkeit v_{xr} (s. 5.6.3.3) bzw. v_{Bmax} (s. 5.6.4) nach der folgenden Beziehung zu bestimmen:

Steingröße D_{50} aus Schraubenstrahl [m]

$$D_{50} \geq B_S \frac{v_{max,S}^2}{g} \frac{1}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-3)$$

mit

B_S Beiwert bei Strahlangriff auf ebener Sohle [-]

$B_S \approx 1,23$ für Schiff ohne Zentralruder und Binnenschiff mit Tunnelheck, Standardsituationen 1, 4 (s. 5.6.3.1) und Bugstrahlruder (s. 5.6.6)

$B_S \approx 0,64$ für Schiff mit Zentralruder, Standardsituationen 2 und 3 (s. 5.6.3.1)

$v_{max,S}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle [m/s]

$v_{max,S} = v_{xr}$ bzw. v_{xr1} nach exakter Berechnung, s. 5.6.3.3

$v_{max,S} = v_{Bmax}$ bzw. v_{Bmax1} nach vereinfachter Berechnung, s. 5.6.4

$v_{max,S} = v_{max,S,Berg}$ bzw. $v_{max,S,Tal}$ im Sonderfall paralleler Strömung zum Schiffspfad, s. 5.6.5

Trifft der Strahl aus dem Hauptantrieb oder dem Bugstrahlruder auf eine Uferböschung, ist der o. g. B_S -Wert abhängig von der Längs- und Querneigung in Strahlrichtung (s. Bild 6.1) und durch $B_{S,B\phi}$ nach Gl. (6-4) zu ersetzen:

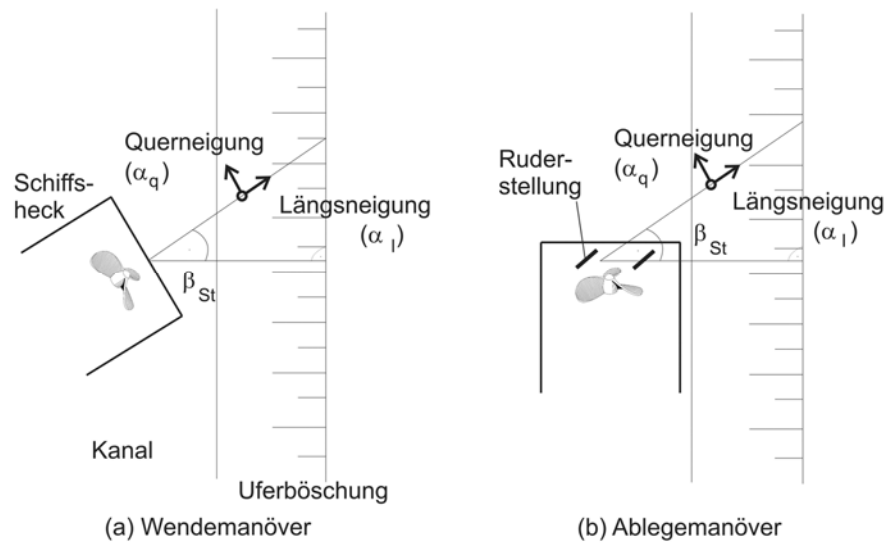


Bild 6.1 Prinzipskizze zum Strahlgriff auf ein geböschtes Ufer bei (a) einem Wendemanöver oder bei (b) Umlenkung des Strahls bei einem Ablegemanöver

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{S,B\phi} = B_S / K \\ K = K_l K_q \\ K_l = \frac{\sin(\alpha_l + \phi'_{D,hydr})}{\sin \phi'_{D,hydr}} \\ K_q = \cos \alpha_q \sqrt{1 - \frac{(\tan \alpha_q)^2}{(\tan \phi'_{D,hydr})^2}} \\ \tan \alpha_l = \tan \beta \cos \beta_{St} \\ \tan \alpha_q = \tan \beta \sin \beta_{St} \end{array} \right. \quad (6-4)$$

mit

K Neigungsbeiwert [-]

K_l Längsneigungsbeiwert [-]

K_q Querneigungsbeiwert [-]

α_l Längsneigungswinkel [°]

α_q Querneigungswinkel [°]

β Böschungswinkel [°], $\beta = \arctan(1/m)$

β_{St} Winkel zwischen Strahlachse und Böschungsnormale (Angriffswinkel) [°]

$\phi'_{D,hydr}$ Reibungswinkel des Deckschichtmaterials [°], i. d. R. 45°

Anmerkung: Für die hydraulische Bemessung wird von einem unteren Grenzwert des Reibungswinkels ausgegangen.

6.3.2 Steingröße zur Begrenzung der Kolkentiefe infolge Schraubenstrahl

Zur Abschätzung der Kolkentiefe aus Schraubenstrahlbelastung bzw. zur erforderlichen Steingröße bei vorgegebener tolerierter Kolkentiefe kann auf die von /Römisch 1975/ und /Ducker, Miller 1996/ angegebenen Gleichungen zurückgegriffen werden:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_{\text{Kolk}}}{D_{85}} = C_m \cdot 0,1 \left(\frac{B^*}{B_{85}^*} \right)^{13} \quad \text{für } 1 \leq \frac{B^*}{B_{85}^*} \leq 1,4 \\ \frac{h_{\text{Kolk}}}{D_{85}} = C_m \cdot 4,6 \left(\frac{B^*}{B_{85}^*} \right)^{2,25} \quad \text{für } \frac{B^*}{B_{85}^*} > 1,4 \\ B^* = \frac{v_{\text{max,S}}}{\sqrt{g' D_{85}}} \\ B_{85}^* = B_{85,0}^* \sqrt{K} \end{array} \right. \quad (6-5)$$

mit

B^* Belastungsbeiwert [-]

B_{85}^* Stabilitätsbeiwert auf geneigter Böschung [-]

$B_{85,0}^*$ Stabilitätsbeiwert allgemein [-]

$B_{85,0}^* = 1,25$ Standardsituationen 1 und 4 (s. 5.6.3.1) sowie Bugstrahlruder (s. 5.6.6)

$B_{85,0}^* = 1,73$ Standardsituationen 2 und 3 (s. 5.6.3.1)

C_m Beiwert für die Belastungsdauer [-]

$C_m = 1,0$ für Dauerbelastung

$C_m = 0,3$ für Kurzzeitbeanspruchung bei Manövrierfahrt und bei Kolkbildung in Deckwerken mit üblichen Wasserbausteinen (gilt nicht für Sand oder Kies)

g' relative Dichte [m/s^2], $g' = g ((\rho_S - \rho_W)/\rho_W)$

h_{Kolk} Kolkentiefe unter der Gewässersohle [m]

K Neigungsbeiwert [-], s. Gl. (6-4)

$v_{\text{max,S}}$ maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle [m/s]

- bei Hauptantrieb v_{Bmax} oder v_{Bmax1} nach 5.6.4

- bei Bugstrahlruder v_{xmax} oder $v_{\text{max,S,K}}$ nach 5.6.6

ρ_W Dichte des Wassers [kg/m^3]

ρ_S Dichte des Steinschüttmaterials [kg/m^3]

Für kleine Korngrößen und große Kolkiefen ist die zeitliche Kolkentwicklung genauer als mit dem Beiwert C_m zu beachten /Gaudio, Marion 2003/.

Die Auflösung der Gl. (6-5) nach D_{85} bei vorgegebener tolerierter Kolkentiefe führt zu Mehrdeutigkeiten. Deshalb sollte bei der Anwendung der Gleichungen h_{Kolk} als Funktion von D_{85} aufgetragen und ein plausibler Wert für erf D_{85} daraus abgelesen werden. Zusätzlich sollte die folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\text{erf } D_{85} \leq \frac{\text{vorh } D_{85}}{\text{vorh } D_{50}} \text{ erf } D_{50} \quad (6-6)$$

mit

$\text{erf } D_{50}$ erforderlicher Steindurchmesser bei 50% Siebdurchgang [cm]

$\text{erf } D_{85}$ erforderlicher Steindurchmesser bei 85% Siebdurchgang [cm]

$\text{vorh } D_{50}$ vorhandener Steindurchmesser bei 50% Siebdurchgang [cm] der mittleren Kornverteilungskurve

$\text{vorh } D_{85}$ vorhandener Steindurchmesser bei 85% Siebdurchgang [cm] der mittleren Kornverteilungskurve

6.4 Steingröße bei Belastung durch Sekundärschrägwellen

Bei uferparalleler Fahrt und $v_s / \sqrt{g h_m} < 0,8$ treffen die Wellenkämme der vom Schiffsbug und -heck ausgehenden Schrägwellen in einem Winkel β_W von ca. 55° auf das Ufer (s. Bild 5.20). Die schiffserzeugten Sekundärwellen können nach /Verhey, Bogaerts 1989/ wie auflaufende Wellen behandelt werden, wenn die Wellenhöhe wie folgt mit dem Faktor $\cos \beta_W$ abgemindert wird:

nominale Steingröße D_{n50} aus Sekundärschrägwellen [m]

$$D_{n50} \geq \frac{H_{\text{Sek}} (\cos \beta_W)^{1/2} \xi^{1/2}}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} 2,25 (\cos \beta + \sin \beta)}$$

$$\xi = \tan \beta \left(\frac{\lambda_s}{H_{\text{Sek}}} \right)^{1/2} \quad (6-7)$$

mit

H_{Sek} Sekundärwellenhöhe [m] nach 5.5.5, ggf. überlagert mit Windwellen nach 5.7

λ_s Wellenlänge der Sekundärschrägwelle [m], nach Gl. (5-59)

β Böschungswinkel [$^\circ$]

β_W Winkel zwischen Wellenkamm der Sekundärschrägwelle und Uferlinie [$^\circ$], i. d. R. $\beta_W = 55^\circ$ s. Bild 5.20

ξ Brecherkennzahl [-]

Bei uferparallel laufenden Heckquerwellen können näherungsweise die Gl.n (6-1) und (6-2) verwendet werden. $H_{u,\text{Heck}}$ ist dabei durch $H_{\text{Sek},q}$ nach Gl. (5-61), begrenzt durch Gl. (5-65) zu ersetzen.

6.5 Steingröße bei Windwellen bzw. kombinierter Schiffs- und Windwellenbelastung

Wird – was im Binnenbereich bei großen Wasserflächen der Fall sein kann – die Deckschicht ausschließlich durch Windwellen belastet, kann der erforderliche mittlere nominale Steindurchmesser D_{n50} nach 6.5 im GBB 2004 /BAW 2004/ bestimmt werden.

In seltenen Fällen können sich Sekundärschrägwellen und Windwellen ungünstig, i. d. R. hinter dem Schiff, überlagern. Näheres dazu ist in 6.6 im GBB 2004 /BAW 2004/ zu finden.

6.6 Steingröße bei Strömungsangriff

Die geplante Deckschicht muss neben den Belastungen aus Schiffs- und evtl. Windwellen auch dem Strömungsangriff parallel zu Böschung und Gewässerbett standhalten. Dieser resultiert aus der natürlichen Strömung, der Rückströmung, ggf. aus der Überlagerung der beiden vorgenannten Größen oder aus der Wiederauffüllungsströmung der brechenden Heckwelle.

6.6.1 Steingröße bei weitgehend böschungsparallelem Strömungsangriff

Zur groben Abschätzung der Steingröße kann folgende Formel dienen /PIANC 1987a/:

Steingröße D_{50} aus Strömung [m]

$$D_{50} \geq C_{Isb} C_{B\phi} \frac{v_{\max}^2}{g} \frac{1}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} \quad (6-8)$$

mit

$C_{B\phi}$ Faktor zur Berücksichtigung des Böschungseinflusses [-], $C_{B\phi} = 1/k$

C_{Isb} Faktor nach Isbash [-], $C_{Isb} \approx 0,7$

D_{50} erforderliche Steingröße (Siebkorndurchmesser) [m] bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie

g Erdbeschleunigung [m/s²]

k Faktor [-]

$$k = \cos\beta [1 - (\tan^2\beta / \tan^2 \phi'_{D,hydr})]^{0,5} \quad (6-9)$$

v_{\max} maximale Strömungsgeschwindigkeit [m/s] aus Rückströmung und Fließgeschwindigkeit $v_{Str,Ufer}$ in Ufer-nähe (im Abstand der Grenzschichtdicke des Rückströmungsfeldes) nach Gl. (5-39) und (5-40) in 5.5.4.6

β Böschungswinkel [°]

$\phi'_{D,hydr}$ Schüttwinkel des Deckschichtmaterials [°], i. d. R. $\phi'_{D,hydr} = 45^\circ$

ρ_w Dichte des Wassers [kg/m³]

ρ_s Dichte des Schüttsteinmaterials [kg/m³]

Gl. (6-8) basiert auf einer Grenzdefinition von Isbash /DVWK 1997/, die für horizontale und schwach geneigte Sohlen die Stabilität bei reinem Strömungsangriff gewährleistet. Im Vergleich zu anderen Ansätzen /DVWK 1997/; Söhngen, Koll 1997/ liefert Gl. (6-8) die größeren Werte.

Die Erweiterung der Grundgleichung um den Faktor $C_{B\phi}$ beschreibt die Vergrößerung des erforderlichen nominalen Steindurchmessers D_{n50} infolge des Böschungswinkels β und des Schüttwinkels des Deckschichtmaterials $\phi'_{D,hydr}$ der Steinschüttung. Die Abhängigkeit $C_{B\phi} = \text{Fkt.}(\beta, \phi'_{D,hydr})$ ist in Bild 6.2 zu sehen.

Der Bewegungsbeginn des natürlichen Sohlenmaterials (anschließend an den Deckwerksfuß) lässt sich abschätzen mit Ansätzen von **Hjulström** (empirischer Ansatz; Zusammenhang mittlere Fließgeschwindigkeit und mittlerer Korndurchmesser), **Shields** (halb-empirischer Ansatz; Zusammenhang Sohlenschubspannungsgeschwindigkeit und Sohlrauheit; iterative Lösung) oder **Bonnefille** (wie Shields; direkte Lösung), die in /Dittrich 1998/ ausführlich dargestellt werden. Alle diese Methoden gelten für gleichförmiges Sohlenmaterial ($U = D_{60}/D_{10} < 3$) mit Korngrößen $D < 100$ mm.

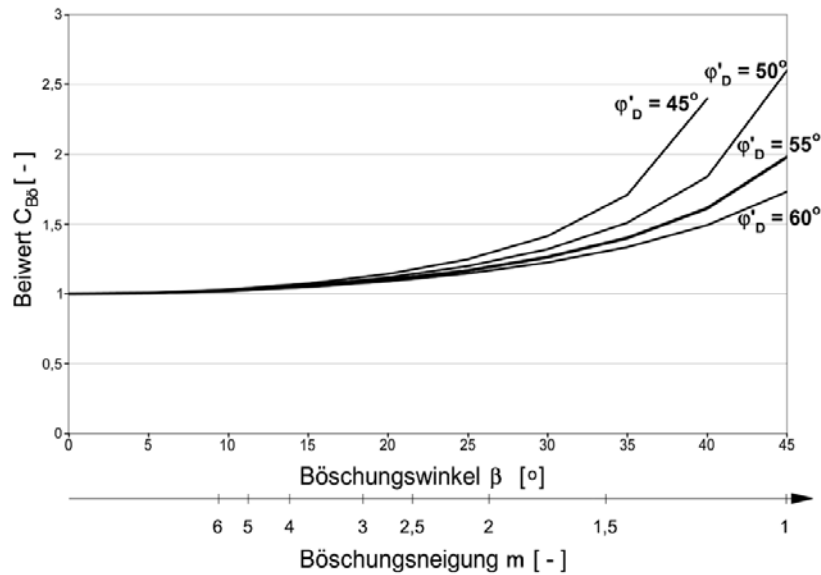


Bild 6.2 Abhängigkeit des Faktors C_{B0} von dem Böschungswinkel β bzw. der Böschungsneigung m und dem inneren Reibungswinkel $\phi'_{D,hydr}$

6.6.2 Steingröße bei Böschungsbelastung durch Wiederauffüllungsströmung

Für die hochturbulente, z. T. mit Luft durchmischte, böschungsparelle und kurzzeitige Strömungsbelastung, die bei einer gebrochenen Heckquerwelle auftritt (Brecherkriterium nach Bild 5.15 in 5.5.4.5), wenn die Absunkmulde vom Heck her aufgefüllt wird, ist der Beiwert C_{Isb} in Gl. (6-8) abzumindern. Danach ergibt sich mit dem Größtwert der Strömungsgeschwindigkeit u_{max} unter Berücksichtigung der Grundströmung für den Korndurchmesser D_{50} :

Steingröße D_{50} aus Wiederauffüllungsströmung [m]

$$D_{50} \geq 0,5 C_{B0} \frac{u_{max,B}^2}{g} \frac{1}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W}} \quad (6-10)$$

mit

$u_{max,B}$ Bemessungsgeschwindigkeit in der Wiederauffüllungsströmung [m/s] unter Berücksichtigung der Grundströmung in Ufernähe nach Gl. (5-41) und (5-42) in 5.5.4.6

Wegen der geringen Wassertiefe in der Wiederauffüllungsströmung, die in etwa der Wellenhöhe entspricht, sind Grenzschichteffekte zu beachten. Eine raue Böschung führt daher zu größeren Böschungsbeanspruchungen als eine Böschung, die mit kleinen Korngrößen gesichert ist. Dieser Effekt kann nach /BAW 2009/ näherungsweise unter Einbeziehung der Heckwellenhöhe wie folgt berücksichtigt werden:

Steingröße D_{50} [m] unter Berücksichtigung der Heckwellenhöhe

$$D_{50} \geq \left(\frac{u_{max,B}^2 C_{B0}}{\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} g 1,4 H_{u,Heck}^{1/3}} \right)^{3/2} \quad (6-11)$$

mit

$H_{u,Heck}$ Maximalwert der Heckwellenhöhe [m] inklusive Sekundärwellenanteil im Bereich der Böschung nach 5.5.4.4, Gl. (5-32)

Die oben angegebenen Formeln können wegen der Unsicherheiten in der Bestimmung von $u_{max,B}$ nur einen ersten Anhalt zur erforderlichen Deckwerkssteingröße liefern. Sie zeigen aber, dass die Schiffsgeschwindigkeit und die Höhe der brechenden Heckwelle, von der $u_{max,B}$ im Wesentlichen abhängt, entscheidend für die Steingröße sind.

6.7 Steingröße unter Berücksichtigung aller Belastungsarten

• Normalfahrt

Da die Ufer bei einer Normalfahrt immer allen Belastungen gleichzeitig ausgesetzt sind, müssen für die Ermittlung einer sinnvollen Einzelsteingröße auch alle Bemessungsformeln entsprechend ihrem Wirkungsanteil berücksichtigt werden. Daraus resultiert ein Wichtungskonzept, das die physikalischen Zusammenhänge der einzelnen Belastungsgrößen berücksichtigt und diese gleichwertig in die Berechnung der Steingröße einbezieht:

- Heckquerwelle und Wiederauffüllungsströmung gehören zum Primärwellenfeld der Schiffsumströmung, die über die Gl.n (6-1), (6-2), (6-10) und (6-11) Steingrößen liefern, die jeweils zu 25 % berücksichtigt werden.
- Die Rückströmung ist ein separater Vorgang, weswegen Gl. (6-8) zu 100 % anzusetzen ist.
- Beim Sekundärwellenfeld liefert allein Gl. (6-7) für Schrägwellen eine Steingröße, die Gl.n (6-1) und (6-2) gleichwertig für die Querwellen; von Schräg- und Querwellen ist das Maximum zu wählen.

Alle drei Gruppen liefern jeweils ein Ergebnis für die Einzelsteingröße, von denen als bemessungsrelevante Einzelsteingröße das Maximum zu verwenden ist. Die Vorgehensweise ist auf Bild 6.3 schematisch dargestellt.

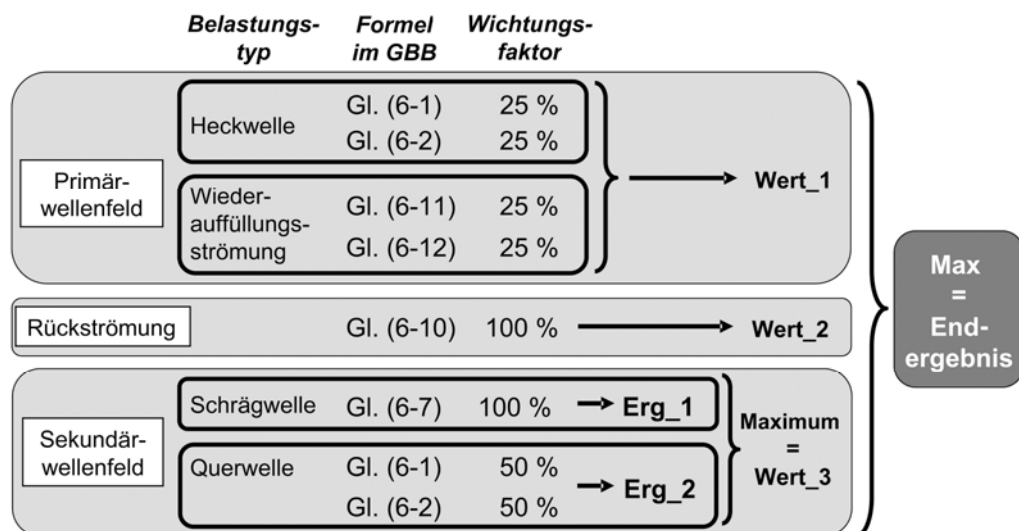


Bild 6.3 Schema des Wichtungskonzeptes zur Berücksichtigung aller Belastungen zur Festlegung der erforderlichen Einzelsteingröße

• Manövrierfahrt

Bei Manövrierfahrt sind zur Ermittlung der Einzelsteingröße die Gl.n (6-3), (6-4) und (6-5) zu verwenden.

6.8 Steingrößen und Steinklassen

Die Beschreibung der Dimension von Wasserbausteinen kann anhand der folgenden vier Kennwerte erfolgen:

1. Siebdurchmesser D : Kantenlänge des kleinsten Quadratlochsiebs, durch das der Stein noch durchgeht
2. Masse G : Masse des Wasserbausteins

3. Steinlänge L : Größte Abmessung des Wasserbausteins (Größenkriterium der alten /TLW 1997/)
4. nominaler Steindurchmesser D_n : Kantenlänge eines gewichtsgleichen Würfels

Die Kennwerte D , G und L werden nach /DIN EN 13383/ Teil 2 bestimmt, D_n wird aus G und der Rohdichte der Wasserbausteine ρ_s berechnet. Die verschiedenen Dimensionen können näherungsweise entsprechend Tabelle 6.1 umgerechnet werden:

Tabelle 6.1 Rechenvorschriften zur Umrechnung verschiedener Steindimensionen

		Ausgangsgröße			
		D_n	G	D	L
Zielgröße	D_n	-	$\sqrt[3]{\frac{G}{\rho_s}}$	$\sqrt[3]{SF} D$	$\frac{L}{\psi}$
	G	$\rho_s D_n^3$	-	$\rho_s SF D^3$	$\rho_s \left(\frac{L}{\psi}\right)^3$
	D	$\frac{D_n}{\sqrt[3]{SF}}$	$\sqrt[3]{\frac{G}{SF \rho_s}}$	-	$\frac{L}{\psi \sqrt[3]{SF}}$
	L	ψD_n	$\psi \sqrt[3]{\frac{G}{\rho_s}}$	$\psi \sqrt[3]{SF} D$	-

Symbole:

ρ_s Rohdichte der Wasserbausteine [kg/m³]

ψ Verhältnis Steinlänge L / nominaler Steindurchmesser D_n [-], falls nicht bekannt $\psi = 1,8$

SF Formfaktor (engl.: shape factor) [-], $SF = c / \sqrt{ba}$

$0,5 \leq SF \leq 0,8$ für Wasserbausteine nach /TLW 1997/

$SF = 0,65$ typischer Mittelwert für Wasserbausteine

a größte Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.4

b mittlere Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.4

c kleinste Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach Bild 6.4

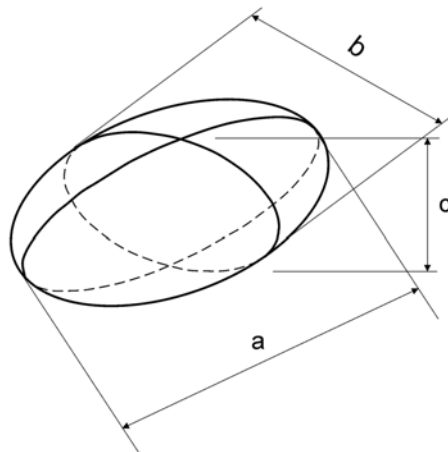


Bild 6.4 Zur Definition der Abmessungen a , b und c eines Wasserbausteins

Eine Steinschüttung besteht innerhalb bestimmter Grenzen immer aus verschiedenen großen Steinen. Die Größe und deren prozentualer Anteil der in einer Steinschüttung vorhandenen Steine ist in der Summenlinie (Kornverteilung), wie sie Bild 6.5 für den Siebdurchmesser D zeigt, erkennbar.

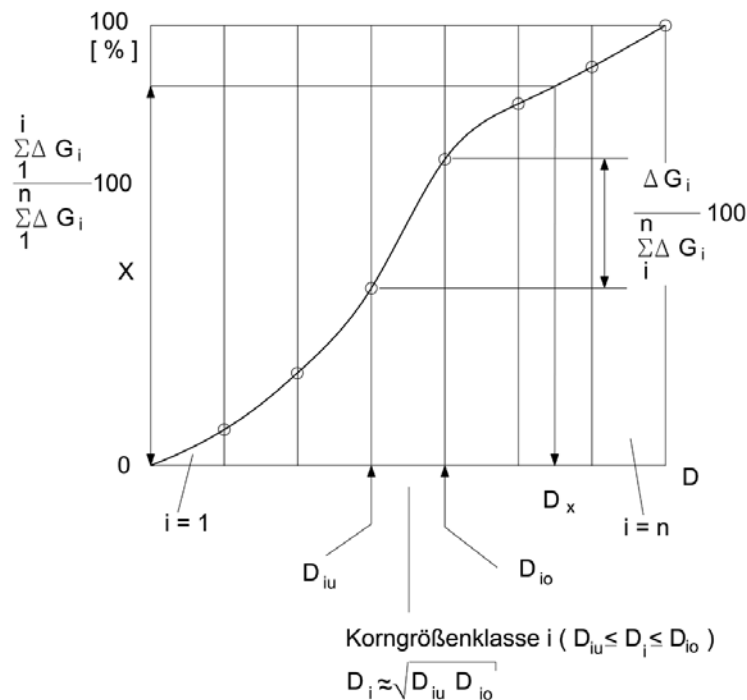


Bild 6.5 Summenlinie mit Definition der Korngröße D_x

Erläuterung: ΔG_i entspricht dem Gewichtsanteil einer Siebprobe, der durch das Sieb mit D_{io} fällt und auf dem Sieb mit D_{iu} liegen bleibt

Aus der Summenlinie ist die Größe D_x ableitbar. D_x ist der Steindurchmesser, der von X Massenprozent einer Steinfraction unterschritten wird. Der Bemessungswert für lose Wasserbausteine ist größtenteils D_{50} (vgl. 6.2 - 6.6).

Der Durchmesser D_x , der zu einem zwischen den zwei Werten X_{iu} und X_{io} liegenden Massenanteil X gehört, kann durch log-lineare Interpolation berechnet werden (Bezeichnung s. Bild 6.5):

$$D_x = D_{iu} \left(\frac{D_{io}}{D_{iu}} \right)^{\frac{X - X_{iu}}{X_{io} - X_{iu}}} \quad (6-12)$$

In der /DIN EN 13383/ Teil1 „Anforderungen“ sind standardisierte Steinklassen mit Grenzen für zulässige Kornverteilungen angegeben. Wesentliche Kennwerte sind hier die untere und die obere Klassengrenze. Ebenso sind die Größe und der zulässige Anteil an Steinen, die unterhalb der unteren Klassengrenze liegen (Unterkorn) bzw. oberhalb der oberen Klassengrenze (Überkorn) liegen, angegeben.

Kleine Wasserbausteine sind in der /DIN EN 13383/ über den Siebdurchmesser D (Kantenlänge des Quadratlochsiebes) definiert und werden als $CP_{x/y}$ - Klasse bezeichnet (Coarse Particle, x untere Klassengrenze [mm], y obere Klassengrenze [mm]). Die größeren Steine werden über das Gewicht G als Leichte Gewichtsklasse $LM_{x/y}$ (Light Mass, x untere Klassengrenze [kg], y obere Klassengrenze [kg]) oder schwere Klasse $HM_{x/y}$ (Heavy Mass) definiert. Für den Einsatz in Deckschichten an Binnenwasserstraßen werden üblicherweise die Klassen $CP_{90/250}$, $LMB_{5/40}$ und $LMB_{10/60}$ verwendet /Kayser 2006/.

Nicht festgelegt ist in /DIN EN 13383/ ein 50%-Wert (D_{50} oder G_{50}), wie er sich aus der hydraulischen Bemessung ergibt. Für eine innerhalb der unteren Klassengrenze D_u und oberen Klassengrenze D_o gleichmäßig verteilte Summenlinie berechnet sich D_{50} nach Gl. (6-12) zu

$$D_{50} = D_u \left(\frac{D_o}{D_u} \right)^{0,5} \quad (6-13)$$

bzw. G_{50} entsprechend

$$G_{50} = G_u \left(\frac{G_o}{G_u} \right)^{0,5} \quad (6-14)$$

6.9 Mindestdicke der Deckschicht

6.9.1 Mindestdicke als Grundlage der Steinbemessung

Die Anwendungen der in 6.2 - 6.6 genannten Bemessungsformeln für die erforderliche Steingröße setzt voraus, dass die Einzelsteine untereinander ein stabiles Steingerüst bilden. Daher muss eine Deckschicht aus losen Wasserbausteinen eine Mindestdicke d_D der Wasserbausteine besitzen. Diese ergibt sich aus den Randbedingungen der verschiedenen Modellversuche, die den Bemessungsansätzen zu Grunde liegen /Dietz 1973/; /Hudson 1959/; /Fuehrer, Römisch 1985/, sowie aus den langjährigen Erfahrungen in dem Betrieb der Wasserstraßen /Kayser 2006/:

mindestens erforderliche Deckschichtdicke d_D [m]

$$\min d_D = (1,5 \div 2,0) D_{n50} \quad (6-15)$$

mit

$\min d_D$ mindestens erforderliche Einbaudicke einer Deckschicht [m]

D_{n50} erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser [m]

Wird der Ungleichförmigkeitsgrad U der Steinschüttung berücksichtigt, so kann als geringste erosionsfeste Einbaudicke geschütteter Steine folgende Dicke empfohlen werden /Abromeit 1997/:

mindestens erforderliche Deckschichtdicke $\min d_D$ [m] bei Beachtung der Ungleichförmigkeit

$$\min d_D = 1,5 D_{n50} \sqrt{U} \quad (6-16)$$

mit

D_{n50} erforderliche mittlere nominale Steingröße [m]

D_{10} Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang [m]

D_{60} Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang [m]

$\min d_D$ mindestens erforderliche Einbaudicke einer Deckschicht [m]

U Ungleichförmigkeitszahl der Steinschüttung [-]

$$U = D_{60}/D_{10} \quad (6-17)$$

Aus den Erfahrungen im Betrieb der Wasserstraße ergeben sich folgende Kriterien /Kayser 2006/:

mindestens erforderliche Deckschichtdicke $\min d_D$ [m] bei Beachtung der Obergrenze der Kornverteilung

$$\begin{aligned} \min d_D &= 1,33 L_{oKIGr} \\ \min d_D &= 1,0 L_{ÜK} \end{aligned} \quad (6-18)$$

mit

L Länge = größte Abmessung eines Wasserbausteins [m] nach /DIN EN 13383/

L_{oKlGr} Länge L eines Steins [m], der der oberen Grenze einer Steinklasse entspricht

$L_{Ük}$ Länge L eines Steins [m], der dem maximal zulässigen Überkorn einer Steinklasse entspricht

Die Werte L_{oKlGr} und $L_{Ük}$ müssen i. d. R. auf der Grundlage der über eine Steinfraktion vorliegenden Daten berechnet werden. Eine Steinfraktion kann über die Klassengrenzen (obere und untere Klassengrenze für Länge, Masse oder Siebdurchmesser) oder über eine Summenlinie (für Längen, Masse oder Siebdurchmesser) definiert werden. Die Formeln zur Berechnung von L_{oKlGr} und $L_{Ük}$ sind abhängig von dieser Definition in der Tabelle 6.2 aufgeführt.

Tabelle 6.2 Berechnung von L_{oKlGr} und $L_{Ük}$ (vgl. Tabelle 6.1)

		Definition über	
		Klassengrenzen	Summenlinie
L_{oKlGr}	Gewichtsklasse	$\psi \sqrt[3]{\frac{G_{oKlGr}}{\rho_s}}$	$\psi \sqrt[3]{\frac{G_{70}}{\rho_s}}$
	Größenklasse	$\psi \sqrt[3]{SF} D_{oKlGr}$	$\psi \sqrt[3]{SF} D_{90}$
	Längenklasse	L_{oKlGr}	L_{90}
$L_{Ük}$	Gewichtsklasse	$\psi \sqrt[3]{\frac{G_{Ük}}{\rho_s}}$	$\psi \sqrt[3]{\frac{G_{100}}{\rho_s}}$
	Größenklasse*	$\psi \sqrt[3]{SF} D_{oKlGr} \left(\frac{D_{oKlGr}}{D_{uKlGr}} \right)^{0,1}$	$\psi \sqrt[3]{SF} D_{100}$
	Längenklasse	$1,33 L_{oKlGr}$	L_{100}

* Für über Klassengrenzen definierte Größenklassen wird als realistische Abschätzung für das Überkorn der 100-% Wert der log-linearen Geraden der oberen Kurve angesetzt.

Symbole:

Ψ Verhältnis Steinlänge L / nominaler Steindurchmesser D_n [-], falls nicht bekannt $\Psi = 1,8$

SF Formfaktor [-] s. Tabelle 6.1

ρ_s Rohdichte der Wasserbausteine [kg/m³]

G Steinmasse [kg]

D Steingröße (Siebkorndurchmesser) [m]

L Steinlänge [m]

Indizes:

uKrGr untere Grenze einer Steinklasse

oKrGr obere Grenze einer Steinklasse

Ük maximal zulässiges Überkorn einer Steinklasse

6.9.2 Mindestdicke wegen Schutzfunktion der Deckschicht

Zur Sicherstellung verschiedener Schutzfunktionen der Deckschicht sind zusätzlich nachfolgend genannte Mindestdicken einzuhalten /Abromeit 1997/.

Die Mindestdicke einer Deckschicht (auf der **Sohle**) für eine ausreichende Sicherheit gegenüber **Ankerwurf** beträgt unabhängig von der verwendeten Steinklasse:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min d_D \geq 0,5 m + x \text{ auf Kornfilter} \\ \min d_D \geq 0,6 m + x \text{ auf Geotextilfilter} \end{array} \right\} \quad (6-19)$$

mit

$\min d_D$ Mindestdicke der Deckschicht [m]

x Zuschlag für verschiedene Steinmaterialien [m]

$x = 0 \text{ m}$ bei Verwendung von Wasserbausteinen

$x = 0,2 \text{ m}$ bei kleinkörnigem oder unsortiertem Material

Die Mindestdicke (an der **Böschung**) für einen ausreichenden **Schutz gegen Schiffsanfahrung** beträgt unabhängig von der verwendeten Steinklasse:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min d_D \geq 0,3 m + x \text{ auf Kornfilter} \\ \min d_D \geq 0,5 m + x \text{ auf Geotextilfilter} \end{array} \right\} \quad (6-20)$$

Bei **Verwendung von Kornfiltern** ist generell abhängig von der verwendeten Steinklasse folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$$\min d_D \geq 1,5 L_{50} + 0,10 \text{ m} \quad (6-21)$$

mit

L_{50} Steinlänge [m] bei 50% Massendurchgang der Summenlinie

Bei der Verwendung von **geotextilen Filtern** ist zur Gewährleistung eines ausreichenden **UV-Schutzes** folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$$\min d_D \geq \text{Maximum} \left\{ \begin{array}{l} 1,5 L_{50} \\ 0,10 \text{ m} \end{array} \right\} \quad (6-22)$$

mit

L_{50} Steinlänge [m] bei 50% Massendurchgang der Summenlinie

6.10 Mindestlänge des Deckwerks in Böschungsfalllinie (Teildeckwerk)

6.10.1 Allgemeines

Wenn sich ein Deckwerk unter der Wirkung der Wellen über Reibung nach 7.2.5.2 auf der Böschung selbst tragen kann und der anstehende Boden unterhalb des unteren Endes der Böschungssicherung nach /MAK 1989/ erosionssicher ist (z. B. Fels, felsartiger Boden), braucht die Böschungssicherung mit Steingröße und Dicke nach o. g. Bemessungsgrundlagen nicht bis zur Gewässersohle geführt zu werden.

Die Länge eines Deckwerks in Richtung der Böschungsfalllinie ist auf den Ruhewasserspiegel RWS zu beziehen. Sie ist abhängig von der Wellenart.

6.10.2 Oberhalb des Ruhewasserspiegels

Die Obergrenze eines Deckwerks hängt von Wellenauflauf (s. 5.5.5.5) und Windstau (s. 5.7.4 im GBB 2004 /BAW 2004/) unter Berücksichtigung des erforderlichen Freibords ab.

6.10.3 Unterhalb des Ruhewasserspiegels

Die Untergrenze eines Deckwerks hängt mit dem erforderlichen mittleren Steindurchmesser D_{n50} zusammen /PIANC 1987a/.

Für **Primärwellen** lässt sich die Tiefe R'_d unter dem RWS aus Bild 6.6 anhand der maximalen Wasserspiegelabsenkung $\Delta \hat{h}_{u,\text{Bug}}$ (s. 5.5.4.2) bzw. $\Delta \hat{h}_{u,\text{Heck}}$ (s. 5.5.4.3) bestimmen. Die Länge des Deckwerks unter dem RWS ist über die Böschungsneigung bzw. den Böschungswinkel zu ermitteln.

Für **Sekundär- und Windwellen** hängt die Tiefe R'_d von der entsprechenden Wellenhöhe H ab und ist Bild 6.7 zu entnehmen. Bei Windwellen z. B. gilt $H = H_S$ als signifikante Wellenhöhe (s. 5.7.5 im GBB 2004 /BAW 2004/).

Der ungünstigere von beiden R'_d -Werten ist maßgebend.

Bei geringem Sicherheitsabstand Schiff - Ufer und der Gefahr einer Uferkollision ist die Tiefe des Deckwerks mindestens unter die Kimm des Schiffes in Fahrt zu ziehen.

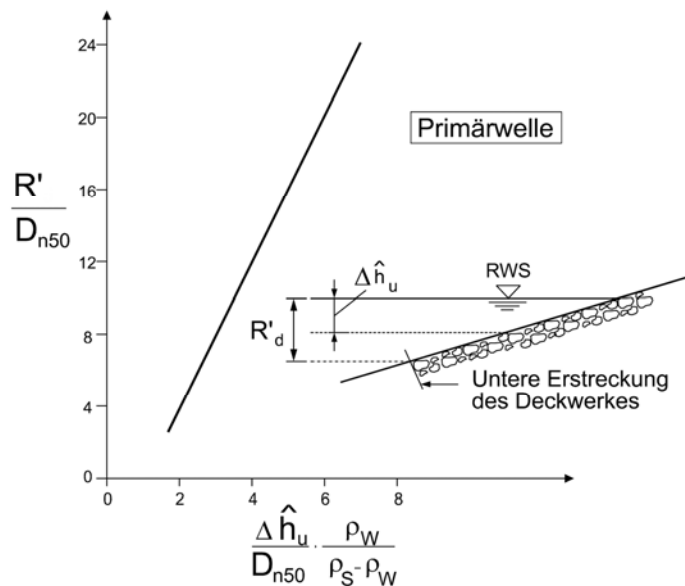


Bild 6.6 Deckwerkslänge unterhalb RWS bei **Primärwellen** nach /PIANC 1987a/

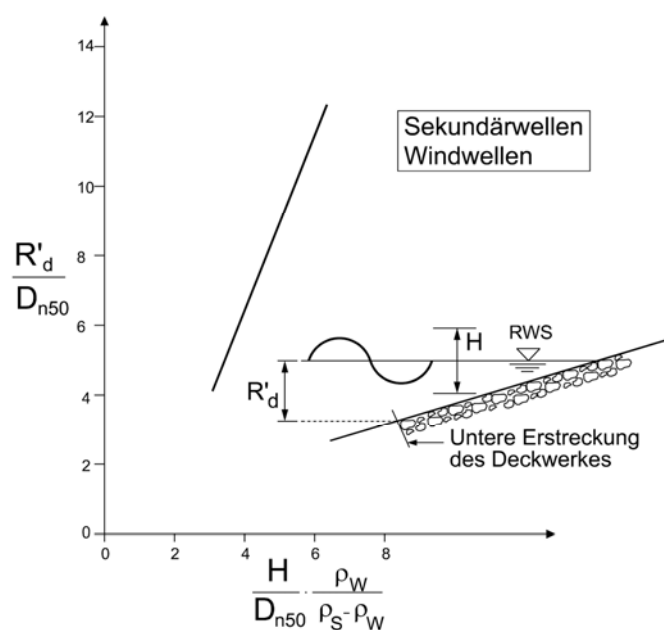


Bild 6.7 Deckwerkslänge unterhalb RWS bei **Sekundär- und Windwellen** nach /PIANC 1987a/

7 Geotechnische Bemessung von ungebundenen Deckschichten

7.1 Grundlagen der Bemessung

7.1.1 Allgemeines

Bei der geotechnischen Bemessung einer Deckschicht ist zwischen der lokalen und der globalen Standsicherheit durchlässiger und dichter Deckwerke zu unterscheiden.

Die lokale Standsicherheit ist für den Lastfall Porenwasserüberdruck infolge schnellen Wasserspiegelabsunkereignisses nachzuweisen. Das hierzu erforderliche Flächengewicht des Deckwerks ist zu ermitteln. Ebenso ist die globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung nachzuweisen.

Bei der geotechnischen Bemessung der Deckschicht darf in allen nachfolgenden Nachweisen das Gewicht des Kornfilters dem Flächengewicht der Deckschicht hinzugerechnet werden.

Für die Wichten des Filtermaterials γ_F und γ'_F kann bei Mineralkornfiltern – auf der sicheren Seite liegend – von einem Porenanteil von $n = 0,45$ ausgegangen werden. Weitere Bemessungshinweise sind in 4.3 enthalten.

Für die Scherfestigkeit von Deckschichten darf ohne weiteren Nachweis ein innerer Reibungswinkel für lose Schüttsteine der Klassen CP_{90/250}, LMB_{5/40}, LMB_{10/60} bis LMB_{40/200} nach /TLW 2003/, von $\varphi'_D = 55^\circ$ (Kohäsion $c' = 0$) und für teilvergossene Deckschichten von $\varphi'_D = 70^\circ$ ($c' = 0$) angesetzt werden.

7.1.2 Maximaler schneller Wasserspiegelabsunk z_a

Für die geotechnische Bemessung von ungebundenen Deckschichten müssen die hydraulischen Eingangsgrößen bekannt sein. Diese leiten sich aus den in Kap. 5 ermittelten hydraulischen Größen ab.

Baugrundkennwerte sind weitere Eingangsgrößen für die geotechnische Bemessung.

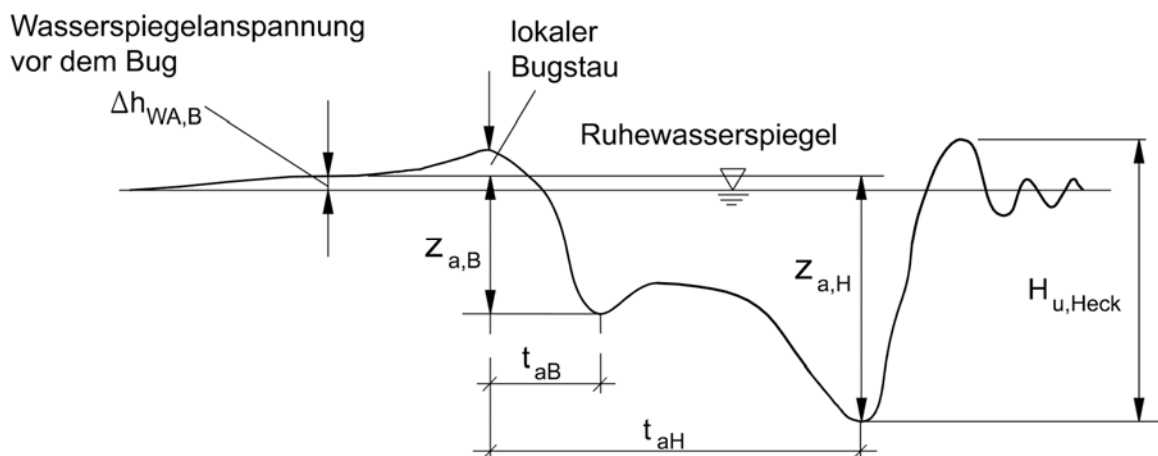


Bild 7.1 Hydraulische Eingangsgrößen für die geotechnische Bemessung (für einen Faktor $f_{\Delta h_{WA,B}} = 1$ in den Gl.n (7-1) und (7-2))

Grundsätzlich kann sowohl die Bugwelle als auch die Heckwelle bemessungsrelevant sein (s. Bild 7.1). Die Absinkzeit der Bugwelle $t_{a,B}$ ist geringer als die der Heckwelle $t_{a,H}$, daher ist der Porenwasserdruckparameter b (s. 7.1.3) bei gleichem Boden für die Bugwelle größer als für die Heckwelle. Allerdings ist der Bugabsunk $z_{a,B}$ in der Regel geringer als der Heckabsunk $z_{a,H}$. Diese beiden Größen gehen nichtlinear in die Ermittlung des Porenwasserüberdruckes Δu (s. 7.1.3) und die kritische Tiefe (s. 7.2.3) ein, welche dann bei der geotechnischen Bemessung entgegengesetzte Auswirkungen auf die erforderliche Deckwerksdicke haben. Da das Zusammenwirken dieser Größen aufgrund der Nichtlinearität nicht vorhergesagt werden kann, kann sowohl die schnelle, aber kleinere Bugwelle als auch die langsamere, jedoch größere Heckwelle für die Deckwerksbemessung maßgebend sein. Es müssen dementsprechend beide Fälle untersucht werden.

Zunächst werden die entsprechenden Absinkzeiten für den Bugabsunk und den Heckabsunk berechnet (s. 5.5.4.8). Mit diesen Absinkzeiten und der Wasserdurchlässigkeit k des Bodens wird der jeweilige Porenwasserdruckparameter b (s. 7.1.3) ermittelt.

Der geotechnisch relevante Absink setzt sich aus der Wasserspiegelanspannung vor dem Schiffsbug und dem nachfolgenden Absink des Wasserspiegels neben dem Schiff zusammen (s. Bild 7.1). Die Wasserspiegelanspannung vor dem Bug tritt maximal etwa 120 s vor dem Absink auf. Ist die hydraulische Durchlässigkeit k des Baugrundes relativ gering, so ist diese Zeit zu kurz, um eine entsprechende Erhöhung des Porenwasserdruckes in der für den späteren Absink relevanten kritischen Tiefe zu bewirken. Dementsprechend ist die Wasserspiegelanspannung vor dem Bug $\Delta h_{WA,B}$ nicht in jedem Fall in voller Größe bei der Ermittlung des für die geotechnische Bemessung relevanten Bugabsunkes $z_{a,B}$ bzw. des Heckabsunkes $z_{a,H}$ zu berücksichtigen. Sie kann nach Gl. (7-1) bzw. Gl. (7-2) über den Faktor $f_{\Delta h_{WA,B}}$ nach Bild 7.2 in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens abgemindert werden. Der lokale Bugstau (s. Bild 7.1), der als stark turbulenter Aufstau eng begrenzt nur direkt vor dem Schiffsbug auftritt, spielt bei den Berechnungen keine Rolle, da er nicht bis zum Ufer wirkt.

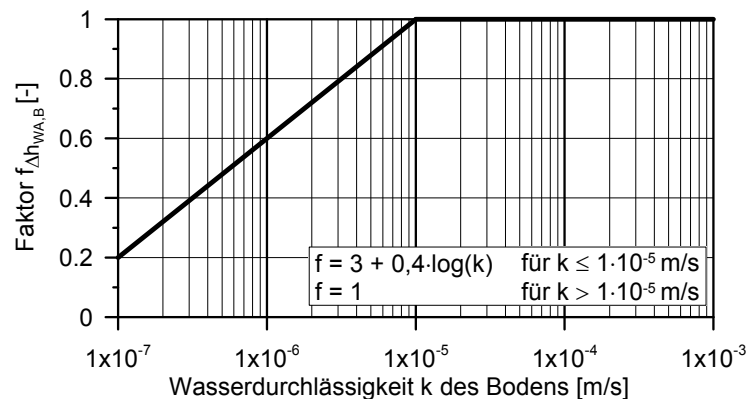


Bild 7.2 Faktor $f_{\Delta h_{WA,B}}$ zur Reduzierung des Einflusses der Wasserspiegelanspannung vor dem Bug auf den maximalen schnellen Wasserspiegelabsink z_a

maximaler schneller Wasserspiegelabsink für den maßgebenden Bugabsink $z_{a,B}$ [m] bzw. den maßgebenden Heckabsink $z_{a,H}$ [m]

$$z_{a,B} = H_{u,Bug} (0,91 + 0,09 f_{\Delta h_{WA,B}}) \quad (7-1)$$

$$z_{a,H} = 0,1 f_{\Delta h_{WA,B}} H_{u,Bug} + H_{u,Heck} - \frac{1}{2} H_{Sek,q} \quad (7-2)$$

$f_{\Delta h_{WA,B}}$ Faktor zur Reduzierung des Einflusses der Wasserspiegelanspannung vor dem Bug nach Bild 7.2

$H_{u,Bug}$ Maximalwert der Bugwellenhöhe am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt [m] nach Gl. (5-31)

$H_{u,Heck}$ Maximalwert der Heckwellenhöhe am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt [m] nach Gl. (5-32)

$H_{Sek,q}$ Sekundärwellenhöhe reiner Heckquerwellen [m] nach Gl. (5-61)

Anmerkung: Da es sich hier um den reinen Wasserspiegelabsink handelt, wird der Maximalwert der Heckwellenhöhe $H_{u,Heck}$ hier ohne Berücksichtigung des Abstandsfalls B nach 5.5.5.1 betrachtet. Bei diesem Fall wird zwar die Höhe der Welle über dem Wasserspiegel erhöht, nicht aber die Tiefe unter dem Wasserspiegel vergrößert.

7.1.3 Größe des Porenwasserüberdrucks Δu

Der Porenwasserüberdruck Δu als Folge eines schnellen Wasserspiegelabsunks lässt sich in Abhängigkeit von der Tiefe z senkrecht unter der Böschungsoberkante bzw. Gewässersohle als Eingangsgröße für die geotechnische Bemessung eines durchlässigen Deckwerks nach folgender Gleichung bestimmen /Köhler 1989/:

Porenwasserüberdruck Δu [kN/m²]

$$\Delta u(z) = \gamma_w z_a (1 - a e^{-bz}) \quad (7-3)$$

mit

- a Porenwasserdruckparameter [-], $a = 1$,
Hinweis: Aus der mathematischen Beschreibung von Messergebnissen können sich andere Werte ergeben.
- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)
- e Eulersche Konstante [-], $e \approx 2,718$
- z Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche [m] bzw. unterhalb der Gewässersohle, normal zum Gewässerbett
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m]
 $z_a = z_{a,B}$ maximaler schneller Wasserspiegelabsunk für den maßgebenden Bugabsunk nach Gl. (7-1)
 $z_a = z_{a,H}$ maximaler schneller Wasserspiegelabsunk für den maßgebenden Heckabsunk nach Gl. (7-2)
- t_a zu z_a gehörige Absunkzeit [s]
 $t_a = t_{a,B}$ beim Bugabsunk nach Gl.n (5-47) und (5-50)
 $t_a = t_{a,H}$ beim Heckabsunk nach Gl. (5-52)
 $t_a = t_{a,B,Sek}$ bei Sekundärwellen nach Gl. (5-51)
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m³], $\gamma_w = \rho_w g$
- ρ_w Dichte des Wassers [kg/m³]

Der Porenwasserdruckparameter b ist ein Maß für die Abnahme des Porenwasserüberdrucks Δu mit der Tiefe.

Je größer b ist, desto größer ist der Porenwasserüberdruck Δu im Untergrund und desto stärker ist seine destabilisierende Wirkung auf das Deckwerk.

Der Porenwasserdruckparameter b kann in Abhängigkeit von der Wasserdurchlässigkeit des Bodens k für eine Absunkzeit $t_a = t_a^* = 5$ s nach Bild 7.3 bzw. Gl. (7-5) bestimmt werden. Dieser Wert $b(k, t_a = 5 \text{ s})$ wird nachfolgend als b^* bezeichnet. Weitere Einflussgrößen wie der Steifemodul E_s und der Sättigungsgrad S des Bodens sind bereits in Bild 7.3 und Gl. (7-5) berücksichtigt /Köhler 1997/.

Die Umrechnung von b^* auf ein b bei einer anderen Absunkzeit $t_a \neq 5$ s kann durch den Faktor $\sqrt{t_a^*/t_a}$ erfolgen:

$$b = b^* \sqrt{\frac{t_a^*}{t_a}} \quad (7-4)$$

mit

- b Porenwasserdruckparameter [1/m]
- b^* Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Bild 7.3 bzw. Gl. (7-5) für $t_a = t_a^* = 5$ s

$$b^* = 0,166 k^{-0,327} \quad (7-5)$$

- t_a Absunkzeit [s]
 $t_a = t_{a,B}$ beim Bugabsunk nach Gl. (5-47)
 $t_a = t_{a,H}$ beim Heckabsunk nach Gl. (5-52)
- k Wasserdurchlässigkeit des Bodens [m/s]

Mit Gl. (7-4) ergeben sich für größere Absunkzeiten $t_a > 5$ s kleinere b -Werte, umgekehrt für kleinere Absunkzeiten $t_a < 5$ s größere b -Werte als für $t_a = 5$ s.

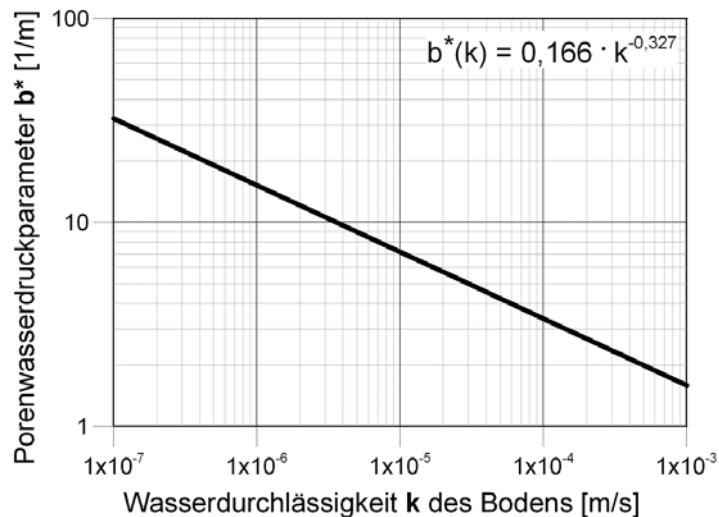


Bild 7.3 Porenwasserdruckparameter b^* in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens k für eine Absunkgeschwindigkeit $v_{za} = 0,12$ m/s [Köhler 1997] bzw. eine Absunkzeit von $t_a^* = 5$ s

7.2 Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke

7.2.1 Allgemeines

Der schnelle Wasserspiegelabsunk eines Gewässers ist immer mit Porenwasserüberdrücken im oberflächennahen Bodenbereich des Gewässerbetts verbunden (s. 3.4.3).

Je nach Absunkgröße und Absunkgeschwindigkeit kann es dadurch bei einem durchlässigen Deckwerk

- zum Abgleiten in einer böschungsp parallelen Bruchfuge des Bodens in der kritischen Tiefe d_{krit} unterhalb des Deckwerks oder
- zu hydrodynamischen Bodenverlagerungen unmittelbar unter dem Deckwerk

kommen, wenn das Flächengewicht des Deckwerks nicht ausreichend groß ist.

Für die Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts eines durchlässigen Deckwerks auf einer Uferböschung, d. h. für den Nachweis der lokalen Standsicherheit, müssen grundsätzlich die geotechnischen Nachweise gegen beide genannten Versagensmechanismen geführt werden. Diese Nachweise können in gleicher Weise auch zur Überprüfung der lokalen Standsicherheit natürlicher Uferböschungen herangezogen werden.

Beträgt die Länge der Absunkmulde bei kurzen Schiffen weniger als 30 m, ist lediglich der Nachweis gegen hydrodynamische Bodenverlagerung nach 7.2.6 zu führen. Aufgrund der räumlichen Wirkung der losen Deckschicht sind die seitlichen Scherkräfte in diesem Fall ausreichend groß, um ein Abgleiten der Deckschicht zu verhindern. Die Länge der Absunkmulde kann nach Gl. (7-6) aus den Absunkzeiten und der Schiffsgeschwindigkeit abgeschätzt werden.

Länge der Absunkmulde L_{AM} [m]

$$L_{AM} = t_{a,H} v_{SüG} \quad (7-6)$$

mit

$v_{SüG}$ Schiffsgeschwindigkeit über Grund [m/s] nach Gl. (5-20)

$t_{a,B}$ Absunkzeit für den Bugabsunk [s] nach Gl.n (5-47), (5-50), (5-51)

$t_{a,H}$ Absunkzeit für den Heckabsunk [s] nach Gl. (5-52)

7.2.2 Hinweise zum Baugrund

Für die Ermittlung der erforderlichen Deckschichtdicke ist neben der Scherfestigkeit insbesondere die Durchlässigkeit des Bodens maßgebend. Je geringer durchlässig der anstehende Boden ist, desto größer ist der Porenwasserüberdruck bei einer bestimmten hydraulischen Belastung. Die Wasserdurchlässigkeit ist aus diesem Grund auf der sicheren Seite liegend am unteren Ende des möglichen Wertespektrums (= geringster Durchlässigkeit) anzusetzen.

Besitzt der Boden eine auch unter Wasser dauerhaft wirksame Kohäsion entsprechend Abschnitt 7.2.5.2 ($c' \geq \Delta u \tan \beta$), kann davon ausgegangen werden, dass die lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke entsprechend 7.2 in der Regel ohne Nachweis gegeben ist.

Bei geschichtetem Baugrund ist – auf der sicheren Seite liegend – das Flächengewicht des Deckwerks für die Schicht zu bemessen, für die das größte Flächengewicht erforderlich ist. Bodenschichten mit geringer Mächtigkeit (≤ 1 m) können i. d. R. vernachlässigt werden. Liegen deutlich unterschiedliche Reibungsparameter bzw. Durchlässigkeitsbeiwerte vor, so ist eine über die Böschungslänge gemittelte Scherfestigkeit bzw. Durchlässigkeit zu wählen.

7.2.3 Tiefenlage der kritischen Bruchfuge d_{krit}

Der Scherwiderstand des Bodens erreicht infolge des Porenwasserüberdrucks in der kritischen Tiefe d_{krit} seinen kleinsten Wert, sodass es an einer Böschung zum Abgleiten einer darüber liegenden Bodenschicht kommen kann. Die Tiefe der kritischen Bruchfuge wird zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts der Deckschicht benötigt. Sie wird wie folgt ermittelt:

Tiefe der kritischen Bruchfuge d_{krit} [m]

$$d_{\text{krit}} = \frac{1}{b} \ln \frac{\tan \varphi' \gamma_W z_a b}{\cos \beta \gamma' (\tan \varphi' - \tan \beta)} \geq 0 \quad (7-7)$$

Hinweis: gültig für $\varphi' > \beta$

mit

b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m]

$z_a = z_{a,B}$ maximaler schneller Wasserspiegelabsink für den maßgebenden Bugabsink nach Gl. (7-1)

$z_a = z_{a,H}$ maximaler schneller Wasserspiegelabsink für den maßgebenden Heckabsink nach Gl. (7-2)

β Böschungswinkel [°]

γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]

γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]

φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Ergibt sich $d_{\text{krit}} \leq 0$, so ist die lokale Standsicherheit auch ohne das Deckwerksgewicht gewährleistet.

Gl. (7-7) ist nur für $\varphi' > \beta$ definiert. Wenn $\beta \geq \varphi'$ wird, ist ein Nachweis mit diesem Rechenansatz nicht mehr möglich. Die Deckschicht ist dann wie eine Stützmauer ohne Biegefestigkeit zu bemessen.

7.2.4 Wichte der Deckschicht unter Auftrieb

Ein wesentlicher Parameter für die Nachweise der lokalen Standsicherheit des Deckwerks ist die Wichte der Deckschicht unter Auftrieb. Sie wird wie folgt berechnet:

Wichte der durchlässigen Deckschicht unter Auftrieb γ'_D [kN/m³]

$$\gamma'_D = (1-n)(\gamma_s - \gamma_W) \quad (7-8)$$

mit

- n Porenanteil des Deckwerks [-]
 γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
 γ_s Rohwichte der Wasserbausteine [kN/m³]
 γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]

Für den Porenanteil n gelten folgende Werte:

- ca. 50 – 55 % bei Verklappen unter Wasser
 ca. 45 % bei Schüttung im Trockenen
 ca. 30 – 40 % bei Nacharbeiten von Hand

Diese Werte gelten unter der Annahme, dass als Deckschichtoberkante die Höhenlage der Steinspitzen angesetzt wird. Der im oberen Deckschichtdrittel erhöhte Porenanteil ist dementsprechend in den Werten berücksichtigt.

7.2.5 Flächengewicht der Deckschicht gegen Abgleiten des Deckwerks auf einer Böschung

7.2.5.1 Allgemeines

Das nachfolgende Berechnungsverfahren zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts einer durchlässigen Deckschicht auf einer Uferböschung beruht auf den Bruchmechanismen, die für das Kräftegleichgewicht im plastischen Grenzzustand nach dem Rankine'schen Sonderfall angesetzt werden.

Als Grundfall wird zunächst fiktiv eine in Fallrichtung unendlich lange Böschung betrachtet. Danach werden die zusätzlichen Einflüsse aus einer Fußstützung oder einer Aufhängung einbezogen.

Es werden die Schubspannungen in der Gleitfläche ermittelt. Darüber hinaus einwirkende Kräfte (z. B. Fußstützung) werden in äquivalente Schubspannungen umgerechnet.

Die Berechnung des Flächengewichts der Deckschicht bzw. der zugehörigen Dicke einer durchlässigen Böschungssicherung erfolgt für die oberflächennahe, böschungsparelle Bruchfuge in der kritischen Tiefe d_{krit} , deren Ermittlung aus 7.2.3 hervorgeht.

7.2.5.2 Rechenverfahren

Das gegen Abgleiten einer Böschung erforderliche Deckschichtgewicht wird nach folgender Gleichung berechnet /Köhler 1989/:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' gegen Abgleiten [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D = \frac{\Delta u \tan \varphi' - c' - \tau_F - \tau_A}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma' d_{krit}) \quad (7-9)$$

Hinweis: gültig für $\varphi' > \beta$

mit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
 d_D Dicke der Deckschicht [m]
 d_F Dicke des Filters [m]
 d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-7)
 g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]
 Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (7-3) für $z = d_{krit}$
 β Böschungswinkel [°]

- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m^3]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m^3]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m^3] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [$^\circ$]
- τ_A Zusatzspannung [kN/m^2] aus einer Aufhängung der Deckschicht (s. 7.2.8)
- τ_F Zusatzspannung [kN/m^2] aus einer Fußstützung (s. 7.2.7).

Gl. (7-9) ist nur für Böden mit einem Reibungswinkel $\varphi' > \beta$ definiert.

Gilt für die wirksame Kohäsion c' des anstehenden Bodens

$$c' \geq \Delta u \tan \beta$$

und ist sie auf Dauer vorhanden, so ist die Sicherheit des Deckwerks gegen Abgleiten auf einem bindigen Boden ausreichend groß. Dies gilt sinngemäß auch für durchlässige Deckschichten auf einer Tondichtung, die in diesem Fall wie ein anstehender bindiger Boden betrachtet wird.

Bei Berücksichtigung einer Fußstützung bzw. Ankerkraft werden die daraus resultierenden äquivalenten Zusatzspannungen τ_F (s. 7.2.7) bzw. τ_A (s. 7.2.8) in Gl. (7-9) eingesetzt. Dabei ist zu beachten, dass diese zur Mobilisierung unterschiedliche Verformungen benötigen und nur entsprechend ihrem Mobilisierungsgrad angesetzt werden dürfen.

Die erforderliche äquivalente Schubspannung $\text{erf } \tau$ ergibt sich für eine gewählte Deckschichtdicke aus Gl. (7-9) wie folgt:

erforderliche äquivalente Schubspannung $\text{erf } \tau$ [kN/m^2]

$$\text{erf } \tau = (d_D \gamma'_D + d_F \gamma'_F + d_{\text{krit}} \gamma') (\sin \beta - \cos \beta \tan \varphi') + \Delta u \tan \varphi' - c' \quad (7-10)$$

mit

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m^2]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-7)
- $\text{erf } \tau$ erforderliche Schubspannung [kN/m^2]
 τ_F bei Fußstützung
 τ_A bei Deckwerksaufhängung
- Δu Porenwasserüberdruck [kN/m^2] nach Gl. (7-3) für $z = d_{\text{krit}}$
- β Böschungswinkel [$^\circ$]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m^3]
- γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m^3]
- γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m^3] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [$^\circ$]

7.2.6 Flächengewicht der Deckschicht gegen hydrodynamische Bodenverlagerungen

7.2.6.1 Allgemeines

Bei großer Fußstützkraft oder bei einer Deckwerksaufhängung, aber auch bei sehr flacher Neigung der Böschung, kann das gegen Abgleiten erforderliche Flächengewicht des Deckwerks so gering werden, dass infolge des Porenwasserüberdruckes eine Hebung der Bodenoberfläche und damit eine Auflockerung des Untergrundes eintreten kann.

Bei **kohäsionslosen Böden** ($c' = 0$) können dadurch unter dem Deckwerk hydrodynamische Bodenverlagerungen möglich werden /Köhler, Koenders 2003/. In einem solchen Fall ist das Flächengewicht so hoch anzusetzen, dass der Porenwasserüberdruck in der kritischen Tiefe durch eine entsprechend hohe Auflast überdrückt wird.

Bei **kohäsiven Böden** ($c' > 0$) tritt hydrodynamische Bodenverlagerung nicht auf, und dieser Nachweis ist deswegen nicht erforderlich.

7.2.6.2 Rechenverfahren

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht unter Auftrieb zur Verhinderung hydrodynamischer Bodenverlagerungen wird in Analogie zum hydraulischen Grundbruch wie folgt berechnet:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' unter Auftrieb gegen hydrodynamische Bodenverlagerung [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D \geq \frac{\Delta u}{\cos \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma' d_{\text{krithB}}) \quad (7-11)$$

mit

b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)

d_D Dicke der Deckschicht [m], gemessen senkrecht zur Oberfläche

d_F Dicke des Filters [m], gemessen senkrecht zur Oberfläche

d_{krithB} kritische Tiefe der Bruchfuge [m], maßgeblich für hydrodynamische Bodenverlagerungen

$$d_{\text{krithB}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma' \cos \beta} \right) \geq 0 \quad (7-12)$$

g' Kraftwirkung des Flächengewichts der Deckschicht [kN/m²]

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2

β Böschungswinkel [°]

γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]

γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$

γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]

Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (7-3) für $z = d_{\text{krithB}}$

7.2.7 Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Fußstützung

7.2.7.1 Allgemeines

Bei entsprechender Ausbildung des Deckwerks am Böschungsfuß nach /MAR 2008/ (z. B. Fußvorlage, Fußeinbindung oder Fußspundwand) kann bei der Ermittlung des Flächengewichts der Deckschicht eine Fußstützkraft berücksichtigt werden, deren Größe aus der Scherfestigkeit des Deckwerks (Bruchmechanismus 1) oder aus der Standsicherheit des Deckwerksfußes (Bruchmechanismus 2) resultiert.

Bei dem Rechenansatz zur Ermittlung der mobilisierbaren Fußstützkraft wurden auf der sicheren Seite liegende Vereinfachungen der Bruchgeometrie und der Scherwiderstände zu Grunde gelegt. Die Fußstützkraft wird als äquivalente Schubspannung in der Gleitfläche eingeführt.

Grundsätzlich sind zwei Bruchmechanismen des gestützten Deckwerks an einer Böschung möglich:

- **Bruchmechanismus 1:** Abscheren des Deckwerks in einer horizontalen Fuge durch den Böschungsfußpunkt (s. Bild 7.4)
- **Bruchmechanismus 2:** Versagen des Deckwerksfußes (s. Bild 7.5, Bild 7.6 und Bild 7.7).

Der Bruchmechanismus, der das größere Deckschichtgewicht ergibt, ist maßgebend. Welcher Bruchmechanismus dies ist, hängt von der Ausbildung des Deckwerksfußes ab.

7.2.7.2 Bruchmechanismus 1 am Böschungsfußpunkt

Im Bruchmechanismus 1 verläuft die Gleitfläche in Höhe der Oberkante des Deckwerksfußes (Böschungsfußpunkt) waagrecht durch das Deckwerk (Bild 7.4). Er ist von der Art der Fußausbildung unabhängig.

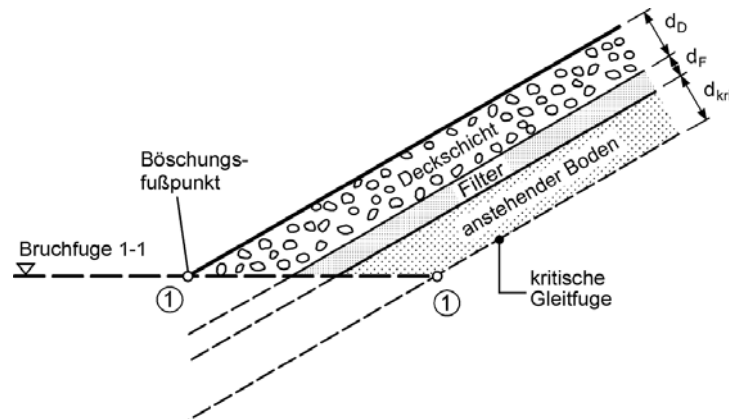


Bild 7.4 Bruchmechanismus 1 einer Fußstützung

Die aus einer Fußstützkraft resultierende äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ unter der Böschungssicherung kann nicht größer werden, als für das Gleichgewicht in Böschungsfallrichtung erforderlich ist.

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht bzw. die zugehörige Deckschichtdicke ergibt sich für den Bruchmechanismus 1 wie folgt:

erforderliche Dicke der durchlässigen Deckschicht d_D für Bruchmechanismus 1 [m]

$$d_D = \sqrt{A^2 + \frac{B}{0,5 C \gamma'_D}} - A \quad (7-13)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$A = (C \gamma'_D d_F - D E \gamma'_D) / C \gamma'_D$$

$$B = D E (d_F \gamma'_F + d_{krit} \gamma') + D F - G$$

$$C = \tan \phi'_D \cos \beta$$

$$D = (\cos \beta - \sin \beta \tan \phi'_D) (h_W - z_a)$$

$$E = \sin \beta - \cos \beta \tan \phi'$$

$$F = \Delta u \tan \phi' - c'$$

$$G = 0,5 d_F^2 \gamma'_F$$

und mit den Symbolen

- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
 d_F Dicke des Filters [m]
 d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-7)
 h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
 z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m], s. 7.1.2
 β Böschungswinkel [°]
 γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
 γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³] für geotextile Filter $\gamma'_F = 0$
 γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
 ϕ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
 ϕ'_D Reibungswinkel des Deckschichtmaterials [°] bei nicht vergossenen Deckschichten $\phi'_D = 55^\circ$
 Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (7-3) für $z = d_{krit}$

Die aus der Scherung durch das Deckwerk maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ in Böschungsfallrichtung ergibt sich zu:

maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F1}$ für Bruchmechanismus 1 [kN/m²]

$$\max \tau_{F1} = \frac{\left(\frac{1}{2} d_F^2 \gamma'_F + \left(d_D d_F + \frac{1}{2} d_D^2 \right) \gamma'_D \right) \tan \phi'_D \cos \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \tan \phi'_D)(h_W - z_a)} \quad (7-14)$$

mit

- d_D Dicke der Deckschicht [m]
 d_F Dicke der Filterlage [m]
 h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
 z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m], s. 7.1.2
 β Böschungswinkel [°]
 γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]
 γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]
 ϕ'_D Reibungswinkel des Deckschichtmaterials [°] bei nicht vergossenen Deckschichten $\phi'_D = 55^\circ$
 $\max \tau_{F1}$ maximal erreichbare äquivalente Schubspannung [kN/m²] unter der Böschungssicherung für Bruchmechanismus 1

7.2.7.3 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage

Im Fall einer Fußvorlage verläuft im Bruchmechanismus 2 die kritische Gleitfuge unmittelbar unterhalb der Filterschicht entlang der Grenze zwischen Untergrund und Fußvorlage und keilt unter dem passiven Erddruckkörper vor der Fußvorlage in Höhe der Gewässersohle aus (s. Bild 7.5). Unter der Böschung verläuft die kritische Gleitfuge wie beim Bruchmechanismus 1 (s. 7.2.7.2).

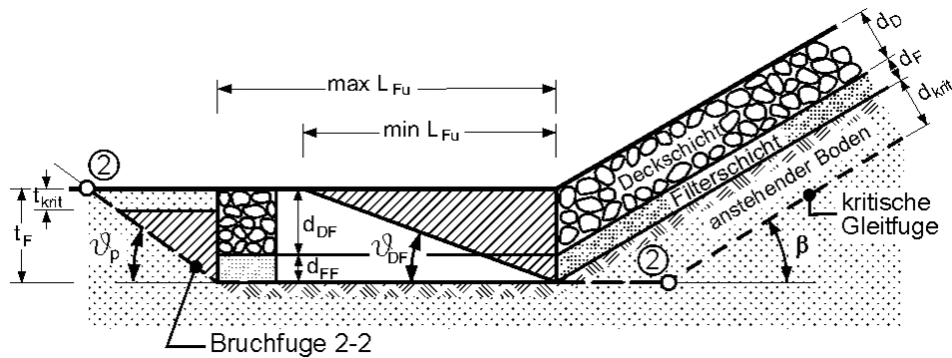


Bild 7.5 Bruchmechanismus 2 bei einer Böschungssicherung mit Fußvorlage

Der durch den Absink z_a erzeugte Porenwasserüberdruck in der Gewässersohle (s. 7.1) bewirkt eine aufwärts gerichtete instationäre Porenwasserströmung, die zur vorübergehenden Destabilisierung des Bodens an der Gewässersohle führt. Sie bewirkt unmittelbar nach Erreichen des maximal einwirkenden Absinks z_a den Verlust der effektiven Spannung des Bodens an der Gewässersohle oberhalb der kritischen Tiefe t_{krit} , wodurch die stützende Wirkung des vor der Fußvorlage mobilisierbaren passiven Erdrucks reduziert wird /Köhler, Koenders 2003/. Die Differenz zwischen der Vertikalspannung aus dem potenziell aufschwimmenden Bodenkörper G' (s. **Anhang A**) und dem zeitlich veränderlichen Porenwasserüberdruck $\Delta u(z)$ an der Gewässersohle ergibt ein Minimum in der kritischen Tiefe t_{krit} . Die überschüssige Energie aus der instationären Porenwasserströmung wird durch die einsetzende vertikale Bodenbewegung dissipiert.

Diese kritische Tiefe t_{krit} an der Sohle (aus Gl. (7-7) für Böschungswinkel $\beta = 0$) berechnet sich zu:

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma_w z_a}{\gamma'} \right) \geq 0 \quad (7-15)$$

Die aus der Fußvorlage maximal ansetzbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ berechnet sich aus den zu fordernden Gleichgewichtsbedingungen (s. **Anhang A**) aller angreifenden Kräfte innerhalb und außerhalb des Böschungsfußstützkörpers (vgl. Bild 7.5), wobei gilt:

 maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ für Bemessungsfall 2 bei einer Fußvorlage [kN/m²]

$$\max \tau_{F2,i} = \frac{\left(d_{DF}^2 \gamma'_{DF} + d_{FF}^2 \gamma'_{FF} + 2 d_{DF} d_{FF} \gamma'_{DF} \right) \sin \beta}{\left[\cos \beta \cot (\varphi'_{DF} + \vartheta_{DF}) - \sin \beta \right] 2 \tan \vartheta_{DF} (h_w - z_a)} \quad \text{innerhalb} \quad (7-16)$$

$$\max \tau_{F2,a} = \frac{\left[(\sigma'_v \tan \varphi' + c') L_{Fu} + E'_{ph} \right] \sin \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi') (h_w - z_a)} \quad \text{außerhalb} \quad (7-17)$$

mit der Gleichung

$$\sigma'_v = \gamma'_{DF} d_{DF} + \gamma'_{FF} d_{FF} \quad (7-18)$$

und mit den Symbolen

b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)

c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]

d_{DF} Dicke der Steinschicht in der Fußvorlage [m]

d_{FF} Dicke des Filters in der Fußvorlage [m]

E'_{ph} horizontaler Anteil des passiven Erdrucks vor der Fußvorlage [kN/m] nach Gl. (7-21)

h_W	Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]
L_{Fu}	Länge der Fußvorlage [m]
$\max \tau_{F2}$	maximal übertragbare äquivalente Schubspannung [kN/m ²] unter der Böschungssicherung infolge der Fußvorlage
t_{krit}	kritische Tiefe an der Gewässersohle [m]
t_F	Dicke der gesamten Fußvorlage [m]
z_a	maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2
β	Böschungswinkel [°]
γ'	Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m ³]
γ'_{DF}	Wichte der Deckschicht in der Fußvorlage unter Auftrieb [kN/m ³]
γ'_{FF}	Wichte des Kornfilters in der Fußvorlage unter Auftrieb [kN/m ³], für geotextile Filter in der Fußvorlage gilt $\gamma'_{FF} = 0$
γ_W	Wichte des Wassers [kN/m ³]
ϑ_{DF}	Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils innerhalb der Fußvorlage [°], $\vartheta_{DF} = 35^\circ$
ϑ_p	Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils im Boden unmittelbar vor der Fußvorlage [°]
σ'_v	effektive Vertikalspannung [kN/m ²]
ϕ'	effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
ϕ'_{DF}	effektiver Reibungswinkel der Steinschüttung in der Fußvorlage [°], $\phi'_{DF} \leq 35^\circ$

Der Ansatz des Erdwiderstandes bei der Fußstützkraft ist nur zulässig, wenn nicht von einem Kolk vor der Fußvorlage auszugehen ist. Andernfalls darf der Erdwiderstand E'_{ph} in Gl. (7-17) nicht angesetzt werden.

Beim Nachweis der inneren, maximal mobilisierbaren Schubspannung $\max \tau_{F2,i}$ im Falle einer Fußstützung ist der Reibungswinkel ϕ'_{DF} auf $\phi'_{DF} = 35^\circ$ zu begrenzen, weil beim Ansatz von größeren Reibungswinkeln die benutzten Algorithmen für den starren Bruchmechanismus beim inneren Nachweis zu unkorrekten Ergebnissen führen.

Zunächst sind die Dicke $t_F = d_{DF} + d_{FF}$ und die Länge L_{Fu} der Fußvorlage festzulegen. Die Wahl der endgültigen Abmessungen für die Fußvorlage muss die nachfolgenden drei Bedingungen erfüllen:

- (1) Für die gewählte Dicke t_F ist die Sicherheit gegen Verflüssigung des Bodens nachzuweisen, um eine ausreichende Minstdicke der Fußvorlage zu gewährleisten. Unter Einbeziehung der kritischen Tiefe t_{krit} unter der Gewässersohle ($\beta = 0$) gilt es, folgende Ungleichung zu erfüllen:

$$d_{DF} \geq \frac{\gamma_W z_a (1 - e^{-b t_{krit}}) - \gamma'_{FF} d_{FF} - \gamma' t_{krit}}{\gamma'_{DF}} \quad (7-19)$$

Für die gewählte Dicke t_F der Fußvorlage muss die erforderliche Minstdicke der Deckschicht d_{DF} die oben angeführte Ungleichung erfüllen. Steht bei geschichtetem Baugrund im Bereich des Böschungsfußes ein anderer Boden als an der Böschung an, so ist für die Ermittlung von b nach Gl. (7-4) und t_{krit} nach Gl. (7-15) die Durchlässigkeit des Bodens am Böschungsfuß zu verwenden.

- (2) Die festzulegende Länge L_{Fu} der Fußvorlage ist so zu bestimmen, dass sie die maximal zulässige Länge ($\max L_{Fu}$) nicht überschreitet und die zum Nachweis der inneren Standfestigkeit erforderliche minimale Länge ($\min L_{Fu}$) gewährleistet.

Für die endgültige Festlegung der Länge L_{Fu} der Fußvorlage gilt

$$\left\{ \begin{array}{l} \min L_{Fu} \leq L_{Fu} \leq \max L_{Fu} \\ \max L_{Fu} = 4 t_F \\ \min L_{Fu} = \frac{t_F}{\tan \vartheta_{DF}} \end{array} \right\} \quad (7-20)$$

mit der vereinfachenden und auf der sicheren Seite liegenden Annahme zur Bestimmung des passiven Gleitflächenwinkels ϑ_{DF} am passiven Erddruckkeil innerhalb der Fußvorlage (innerer Nachweis):

$$\vartheta_{DF} = 35^\circ$$

- (3) Der passive Erddruck vor der Fußvorlage E'_{ph} bestimmt sich mit dem maßgebenden Reibungswinkel φ' des Bodens an der Gewässersohle zu

$$E'_{ph} = (G' - U_v + C' \sin \vartheta_p) \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C' \cos \vartheta_p \quad (7-21)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$G' = \frac{(t_F - t_{krit})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p} \quad \text{und} \quad \vartheta_p = 45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$$

$$C' = \frac{c' (t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}$$

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-b t_F} - e^{-b t_{krit}}}{b} + e^{-b t_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

Beachte: Porenwasserüberdruck U_v ist nur anzusetzen für $U_v \geq 0$; für $U_v < 0$ ist $U_v = 0$ zu setzen

und mit den Symbolen

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)
- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- E'_{ph} horizontaler Anteil des passiven Erddrucks vor der Fußvorlage [kN/m]
- t_{krit} kritische Tiefe an der Gewässersohle [m]
- t_F Dicke der gesamten Fußvorlage [m]
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils im Boden unmittelbar vor der Fußvorlage [°]

Die von der Fußvorlage maximal übertragbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ ergibt sich durch die Vergleichsberechnung aus dem inneren und äußeren Nachweis entsprechend den Gl.n (7-16) und (7-17). Die kleinere der beiden errechneten Schubspannungen ist maßgebend und wird in der nachfolgenden Berechnung des erforderlichen Flächengewichts g' der Deckschicht auf der Böschung berücksichtigt:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei einer Fußvorlage [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D = \frac{\Delta u \tan \varphi' - c' - \max \tau_{F2}}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + d_{krit} \gamma') \quad (7-22)$$

mit

c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]

d_D Dicke der Deckschicht [m]

d_F Dicke des Filters [m]

d_{krit} kritische Tiefe der Bruchfuge [m] nach Gl. (7-7)

g' Kraftwirkung des erforderlichen Flächengewichts [kN/m²] der Deckschicht bei Bruchmechanismus 2

$\max \tau_{F2}$ maximal übertragbare äquivalente Schubspannung [kN/m²] aus der Fußvorlage bei Bruchmechanismus 2: Minimum aus Gl.n (7-16) und (7-17)

Δu Porenwasserüberdruck [kN/m²] nach Gl. (7-3) für $z = d_{krit}$

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2

β Böschungswinkel [°]

γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³], für geotextile Filter gilt $\gamma'_F = 0$

ϕ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

7.2.7.4 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung

Bei der Fußeinbindung wird im Bruchmechanismus 2 eine Gleitfuge untersucht, die unter der Böschung im Abstand d_{krit} von der Grenze Filter/Boden, im Bereich der Fußeinbindung direkt entlang der Grenze Filter/Boden und im Boden unter der Gewässersohle unter dem passiven Erdkeil verläuft (s. Bild 7.6).

Der Porenwasserüberdruck wird auch auf das Deckwerk im Bereich der Fußeinbindung unterhalb der Gewässersohle angesetzt, da sich hier der Verfüllboden in den Porenraum setzen kann und sich somit im Deckwerk die Durchlässigkeit des Verfüllbodens einstellt.

Der schnelle Absenk erzeugt auch im Bereich der horizontalen Gewässersohle einen Porenwasserüberdruck im Boden (s. 7.1) und infolgedessen eine Porenwasserströmung. Oberflächennah bewirkt diese Porenwasserströmung einen Verlust der effektiven Spannungen (Bodenverflüssigung) bis in die kritische Tiefe t_{krit} . In der Tiefe t_{krit} ist die auftriebende Kraft aus der Differenz zwischen dem Porenwasserüberdruck und der Vertikalspannung aus Bodeneigengewicht maximal. Durch die Bodenbewegung dissipiert die Energie aus der Porenwasserströmung. Die kritische Tiefe t_{krit} an der Sohle (Böschungswinkel $\beta = 0$) berechnet sich analog zu Gl. (7-15) aus

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma'_W z_a}{\gamma'} \right) \geq 0 \quad (7-23)$$

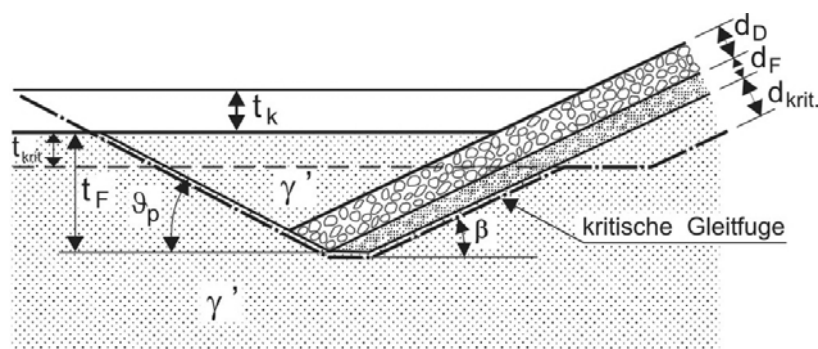


Bild 7.6 Bruchmechanismus 2 bei einer Böschungssicherung mit Fußeinbindung

Die maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ berechnet sich aus den Gleichgewichtsbedingungen für den in Bild 7.6 dargestellten Gleitkeil:

maximal erreichbare äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung [kN/m²]

$$\begin{aligned} \max \tau_{F2} &= \frac{F_{F2}}{L_u} \geq 0 \\ L_u &= \frac{h_W - z_a + t_k + t_{krit}}{\sin \beta} \\ F_{F2} &= \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 A}{B} + \frac{U_{v2} - G'_2}{D} + C'_2 \end{aligned} \quad (7-24)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$\begin{aligned} A &= \sin \vartheta_p + \cos \vartheta_p \cot(\varphi' + \vartheta_p) \\ B &= \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_p) \\ D &= \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta) \\ U_{v1} &= \frac{\gamma_W z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \\ U_{v2} &= \frac{\gamma_W z_a}{\tan \beta} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \\ G'_1 &= \frac{\gamma'(t_F - t_{krit})^2}{2 \tan \vartheta_p}; \quad G'_2 = \frac{\gamma'(t_F - t_{krit})^2}{2 \tan \beta} \\ C'_1 &= \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}; \quad C'_2 = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \beta} \\ \vartheta_p &= \arctan \left(\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \beta}} - \tan \varphi' \right) \end{aligned}$$

und mit den Symbolen

s. unter Gl. (7-25)

Unter Berücksichtigung der maximal erreichbaren äquivalenten Schubspannung ergibt sich das erforderliche Flächengewicht in diesem Fall wie folgt:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei einer Fußeinbindung [kN/m²]

$$\begin{aligned} g' &= \gamma'_D d_D = \\ &= \frac{\Delta u \tan \varphi' - c' - \max \tau_{F2}}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma'_D d_{krit}) \end{aligned} \quad (7-25)$$

mit

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)
- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- d_D Dicke der Deckschicht [m]
- d_F Dicke des Filters [m]
- d_{krit} kritische Tiefe im Böschungsbereich [m] nach Gl. (7-7)
- h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]

t_F	Tiefe der Fußeinbindung [m]
t_k	Kolkentiefe an der Gewässersohle vor dem Fuß des Deckwerks [m]
t_{krit}	kritische Tiefe an der Sohle [m] nach Gl. (7-23)
Δu	Porenwasserüberdruck [kN/m ²] nach Gl. (7-3) für $z = d_{krit}$
z_a	maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2
β	Böschungswinkel [°]
γ'	Bodenwichte unter Auftrieb [kN/m ³]
γ'_D	Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m ³]
γ'_F	Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m ³]
γ_W	Wichte des Wassers [kN/m ³]
φ'	effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
ϑ_p	Gleitflächenwinkel [°]
$\max \tau_{F2}$	maximal übertragbare äquivalente Schubspannung aus der Fußeinbindung [kN/m ²] nach Gl. (7-24)

Bei der Festlegung der Einbindetiefe t_F ist ggf. ein Kolk mit einer Tiefe von t_k nach örtlichen Erfahrungen gemäß Bild 7.6 zu berücksichtigen.

Bei der Ermittlung der erforderlichen Deckschichtdicke d_D können rechnerisch negative Werte auftreten. In diesem Fall ist für den Nachweis der Fußeinbindung kein Deckwerk erforderlich. Die Deckwerksdicke ergibt sich dann aus dem Bruchmechanismus 1.

7.2.7.5 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußspundwand

Der Bruchmechanismus 2 besteht im Versagen einer eingespannten Fußspundwand als unterem Abschluss einer Böschungssicherung. Bei der Spundwandbemessung sind folgende Einflüsse zu berücksichtigen (s. Bild 7.7):

- (a) die am Spundwandkopf angreifende Fußstützkraft F in Fallrichtung der Deckschicht; F ergibt sich aus der für die gewählte Dicke d_D der Deckschicht noch erforderlichen Schubspannung $\text{erf } \tau_F$ nach Gl. (7-10) in Verbindung mit der folgenden Gleichung

$$F = \text{erf } \tau_F L_u \quad (7-26)$$

mit

h_W Wassertiefe beim Ruhewasserspiegel [m]

L_u Unterwasserlänge der Böschungssicherung [m]

$$L_u = \frac{h_W - z_a}{\sin \beta} \quad (7-27)$$

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2

β Böschungswinkel [°]

$\text{erf } \tau_F$ erforderliche Schubspannung bei einer Fußspundwand [kN/m²] nach Gl. (7-10)

- (b) der aktive Erddruck E'_a im Boden unter der Böschungssicherung

- (c) eine Kolkentiefe t_k , die nach /MAR 2008/ oder nach örtlichen Erfahrungen festzulegen ist

- (d) die kritische Tiefe t_{krit} , in der die Auftriebskraft aus der Differenz zwischen Porenwasserüberdruck und Bodeneigengewicht maximal ist

- (e) der aus beidseitigem Porenwasserüberdruck resultierende Porenwasserüberdruck $U_b = \Delta u(\Delta t_k)$ mit $\Delta t_k > 0$ nach Bild 7.7

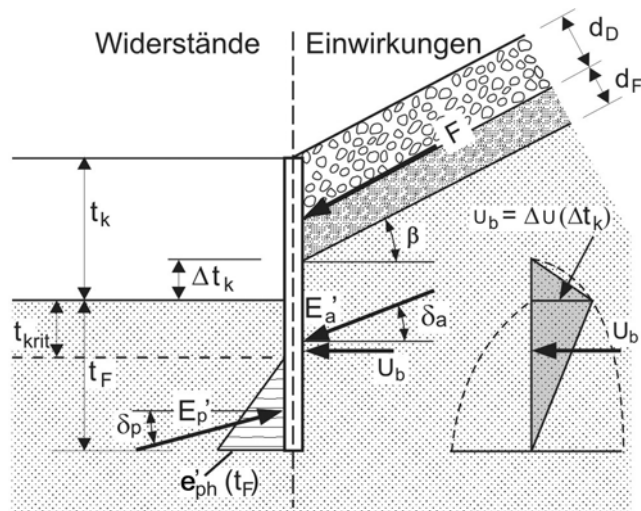


Bild 7.7 Fußstützung einer Böschungssicherung durch eine Spundwand (Bruchmechanismus 2)

Symbole: E_a - aktiver Erddruck, E_p - passiver Erddruck, F - Kraft aus Deckwerk, t_k - Kolkentiefe, U_b - Resultierende des Porenwasserüberdrucks

Die Bemessung der unverankerten Spundwand erfolgt für volle Einspannung nach /EAU 2004/. Der Spannungsnachweis ist bei Ansatz einer Kolkentiefe t_k für den Lastfall 2 /EAU 2004/ zu führen, wenn der Kolk nur von vorübergehender Dauer ist.

Bei der Ermittlung des Erdwiderstandes E'_p vor der Spundwand ist der Porenwasserüberdruck im Bereich der Gewässersohle analog zu Gl. (7-3) zu berücksichtigen. E'_p ist die entsprechend /DIN 4085/ unter dem Wandreibungswinkel $\delta_p = 2/3 \phi'$ geneigte Resultierende des Erdwiderstandes.

Eine vereinfachte, auf der sicheren Seite liegende Ermittlung der horizontalen Erddruckkraft E'_{ph} kann über die Erddruckordinaten e'_{ph} nach der im Folgenden genannten Formel erfolgen, in der die Wirkung des Porenwasserüberdrucks infolge einer schnellen Wasserspiegelabsenkung enthalten ist. Der passive Erddruck kann über die Tiefe linear anwachsend angesetzt werden (s. Bild 7.7).

Erddruckordinate $e'_{ph}(t_F)$ [kN/m²]

$$e'_{\text{ph}}(t_F) = \frac{2E'_p \cos \delta_p}{t_F - t_{\text{krit}}} \quad (7-28)$$

mit den Hilfsfunktionen

$$E'_p = \frac{U_v - G' - C'(\cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi') + \sin \vartheta_p)}{\sin \delta_p - \cos \delta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')}$$

$$C' = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \vartheta_p}$$

$$G' = \frac{\gamma'(t_F - t_{\text{krit}})^2}{2 \tan \vartheta_p}$$

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan g_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

$$\vartheta_p = \arctan \left(\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \delta_p}} - \tan \varphi' \right)$$

$$t_{\text{krit}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma'} \right)$$

und mit den Symbolen

- b Porenwasserdruckparameter [1/m] nach Gl. (7-4)
- c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]
- E'_p passiver Erddruck [kN/m]
- t Tiefe unter Gewässersohle [m]
- t_{krit} kritische Tiefe [m] an der Gewässersohle ($\beta = 0^\circ$) nach Gl. (7-23)
- t_F Tiefe der Fußspundwand [m] (t_F ist größer als t_{krit} zu wählen)
- z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsink [m] s. 7.1.2
- γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
- δ_p Wandreibungswinkel [°], bei Spundwänden i. d. R. $\delta_p = 2/3 \varphi'$
- γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
- φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]
- ϑ_p Gleitflächenwinkel [°]

In Gl. (7-28) ist die vertikale Komponente des Porenwasserüberdrucks Δu im Bereich des Erdwiderstandes bereits enthalten.

Der aktive Erddruck E'_a darf nach /DIN 4085/ mit der Wichte des Bodens unter Auftrieb ermittelt werden.

Der resultierende Wasserdruck auf der aktiven Seite darf vereinfacht in Form eines Dreiecks nach Bild 7.7 angesetzt werden, dessen Ordinate sich in Höhe der Kolksohle aus Gl. (7-3) für die Tiefe $z = \Delta t_k = t_k - (d_F + d_D)/\cos \beta$ und für den Absinkzeitpunkt $t = t_a$ ergibt.

Lässt sich die Fußspundwand für die unter (a) bis (c) genannten Einflüsse bemessen, ist die Standsicherheit der Deckschicht gewährleistet. Andernfalls muss das Gewicht der Deckschicht oder die Einbindetiefe und ggf. das Widerstandsmoment der Spundbohlen erhöht werden.

7.2.8 Flächengewicht der Deckschicht bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung

7.2.8.1 Allgemeines

Um die Standsicherheit eines Deckwerks zu erhöhen, kann die Deckschicht auch nach oben hin verankert werden ("aufgehängtes Deckwerk") (s. Bild 7.8). Derartige Aufhängungen können entweder aus einzelnen Ankern (Stahlseile, hochzugfeste Gewebefäden) oder aus hochzugfesten Flächenelementen (Geokunststoffe) bestehen.

Bei Verwendung einer Aufhängung (= Verankerung) in Kombination mit anderen stützenden Bauteilen (z. B. Fußsicherung) können letztere aufgrund des unterschiedlichen Mobilisierungsverhaltens statisch nicht angesetzt werden.

Die aufzunehmende Zugkraft Z ergibt sich aus der erforderliche Schubspannung τ nach Gl. (7-10) in Abhängigkeit von der gewählten Deckwerksdicke d_D , multipliziert mit der Länge L_u der unter dem abgesenkten Wasserspiegel liegenden Deckschicht.

Soll die Zugkraft Z durch das Gewicht der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels aufgenommen werden, sind folgende Nachweise zu führen:

- Nachweis der äußeren Tragfähigkeit (s. 7.2.8.2)
- Nachweis der inneren Tragfähigkeit (s. 7.2.8.3)

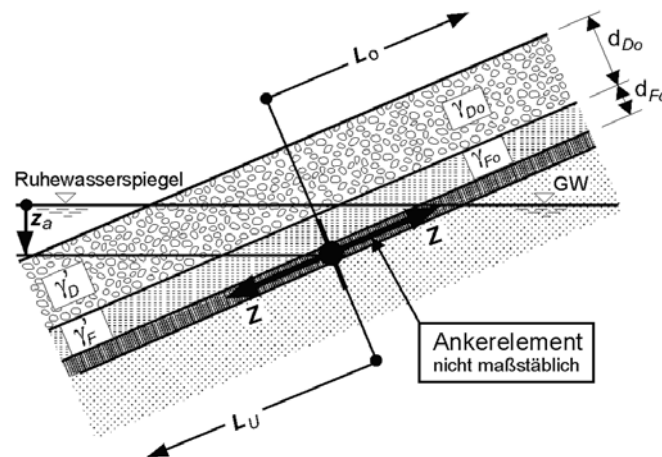


Bild 7.8 Systemskizze einer oberen Aufhängung einer Böschungssicherung

7.2.8.2 Nachweis der äußeren Tragfähigkeit

Wenn die Ankerkräfte oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels durch Reibung unter der Deckschicht in den Baugrund abgetragen werden, ist die äußere Tragfähigkeit wie im Folgenden dargestellt nachzuweisen. Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht ergibt sich zu:

erforderliches Flächengewicht der durchlässigen Deckschicht g' bei Berücksichtigung einer Deckwerksaufhängung [kN/m²]

$$g' = \gamma_{Do} d_{Do} = \frac{Z \cos \varphi'_{AB} - c'_{AB} L_o \cos \varphi'_{AB} - \gamma_{Fo} d_{Fo}}{L_o \sin(\varphi'_{AB} - \beta)} \quad (7-29)$$

mit den Größen

$$Z = \text{erf } \tau_A L_u \quad (7-30)$$

$$L_u = \frac{h_W - z_a + t_k}{\sin \beta} \quad (7-31)$$

und mit den Symbolen

c'_{AB} Kohäsion/Adhäsion zwischen Zuelement und Boden über dem abgesenkten Wasserspiegel [kN/m²]

Hinweis: Ohne Nachweis ist $c'_{AB} = 0$ zu setzen.

d_{Do} Dicke der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]

d_{Fo} Dicke eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]

$\text{erf } \tau_A$ erforderliche zusätzliche stützende Schubspannung [kN/m²], $\text{erf } \tau_A = \text{erf } \tau$ nach Gl. (7-10)

L_u Länge der Böschungssicherung unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels [m]

L_o Länge der Böschungssicherung über dem abgesenkten Wasserspiegel [m]

h_W Wassertiefe bei Ruhewasserspiegel [m]

t_k Kolkentiefe vor dem Fuß des Deckwerks an der Gewässersohle [m], festzulegen nach örtlichen Erfahrungen

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2

Z aufzunehmende Zugkraft einer Deckwerksaufhängung [kN/m]

β Böschungswinkel [°]

- γ_{Do} Wichte der Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel [kN/m³]
 γ_{Fo} Wichte eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [kN/m³]
 φ'_{AB} wirksamer Reibungswinkel [°] zwischen Zugelement und Boden oder Zugelement und Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel; der kleinere Wert ist maßgebend

Andere Lastabtragungen als über Reibung im Deckwerk (z. B. Einbindegraben) sind gesondert für die Zugkraft Z nachzuweisen.

7.2.8.3 Nachweis der inneren Tragfähigkeit

Die innere Tragfähigkeit der Verankerung ist nach den Bemessungsansätzen für Bewehrungselemente nachzuweisen, wie z. B. mit dem Spannungsnachweis bzw. Grenzzustand 1B nach dem Sicherheitskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte gemäß 4.3.2 in /DIN 1054/. Die Gebrauchsfestigkeit von Geokunststoffen darf 2 % der Bruchdehnung nach /DIN EN ISO 10319/ nicht überschreiten.

Ergibt sich eine zu große Dicke d_{Do} der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels, dann kann zur Verminderung der aufzunehmenden Zugkraft das Flächengewicht der Deckschicht d_D unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels erhöht werden. Sofern der Nachweis der inneren Tragfähigkeit dies zulässt, kann auch eine Verankerung der Zugelemente in einem Graben an der Schulter der Uferböschung entsprechend den ‚Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen‘ /EBGEO 1997/ vorgenommen werden.

7.2.9 Böschungssicherung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels

Die Standsicherheit einer Uferböschung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels ist gewährleistet, wenn das für den Erosionsschutz erforderliche Deckwerk bis zum höchsten Wellenauflaufpunkt nach 5.5.5.5 aufgebracht wird.

Tritt bei Uferböschungen im stationären Zustand Grundwasser oberhalb der Böschungssicherung aus der Böschung aus, dann ist nach /DIN 4084/, Ausgabe 2009 die lokale Standsicherheit des parallel zur Oberfläche voll durchströmten Böschungsbereiches gewährleistet, wenn für die ungeschützte Böschung aus kohäsionslosem Material folgende Bedingung erfüllt ist

$$\tan \beta \leq \frac{\gamma'}{\gamma_w + \gamma'} \tan \varphi' \quad (7-32)$$

mit

- β Böschungswinkel oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels [°]
 γ' Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m³]
 γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]
 φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Unter der Annahme, dass die Wichte des Bodens unter Auftrieb gleich der Dichte von Wasser ist, gilt vereinfachend (s. 3.5):

$$\beta < \frac{\varphi'}{2} \quad (7-33)$$

Soweit diese Bedingung nicht erfüllt ist, sind geeignete andere Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden erforderlich, sofern die Böschungssicherung nicht über den Bereich des Sickerwasseraustritts hochgezogen werden soll.

Bindige Böden sind in dieser Hinsicht i. d. R. standsicher.

7.3 Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke

7.3.1 Allgemeines

Kann der Grundwasserspiegel über dem abgesenkten Kanalwasserspiegel liegen, muss das dichte Deckwerk auf den maximal möglichen Wasserüberdruck bemessen werden.

Das Flächengewicht der Deckschicht eines dichten Deckwerks muss so groß sein, dass der Überdruck unter der Dichtung nicht zu einem Abheben des Deckwerkes führt (s. 7.3.2)

Wird das dichte Deckwerk ohne Fußstützung ausgeführt, so ist zusätzlich der Nachweis gegen Abgleiten (s. 7.3.3) zu führen.

7.3.2 Flächengewicht der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abheben

Bei einem dichten Deckwerk an der Sohle oder bei ausreichender Fußstützung eines dichten Deckwerks an der Böschung muss der Nachweis eines ausreichenden Flächengewichts der Deckschicht gegen Abheben erbracht werden.

Das erforderliche Flächengewicht g' der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abheben ergibt sich zu:

erforderliches Flächengewicht g' der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abheben [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D \geq \frac{\Delta u \gamma_A}{\cos \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma'_{Di} d_{Di}) \quad (7-34)$$

mit der Gleichung

$$\Delta u = (\Delta h_W + z_a) \gamma_W \quad (7-35)$$

und mit den Symbolen

d_D Dicke der Deckschicht [m]

d_{Di} Dicke der Dichtungsschicht [m]

d_F Dicke des Filters [m]

g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]

Δu Porenwasserüberdruck unter der Dichtung [kN/m²]

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsenk [m], s. 7.1.2

β Böschungswinkel [°]

Δh_W Höhenunterschied [m] zwischen Grundwasserspiegel und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße: positiv, wenn der Grundwasserspiegel über dem Ruhewasserspiegel liegt

γ_A Sicherheit gegen Auftrieb [-], $\gamma_A = 1,00$

γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_{Di} Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³].

7.3.3 Flächengewicht der Deckschicht eines dichten Deckwerks ohne Fußstützung gegen Abgleiten

Das erforderliche Flächengewicht der Deckschicht einer dichten Böschungssicherung ohne zusätzliche Stützung gegen Abgleiten an der Grenzfläche Dichtung/Boden errechnet sich wie folgt:

erforderliches Flächengewicht g' der Deckschicht eines dichten Deckwerks gegen Abgleiten [kN/m²]

$$g' = \gamma'_D d_D \geq \frac{\Delta u \tan \varphi' - c'}{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma'_F d_F + \gamma'_{Di} d_{Di}) \quad (7-36)$$

mit

c' effektive Kohäsion des Bodens [kN/m²]

d_D Dicke der Deckschicht [m]

d_{Di} Dicke der Dichtungsschicht [m]

d_F Dicke des Filters [m]

g' Flächengewicht der Deckschicht [kN/m²]

Δu Porenwasserüberdruck unter der Dichtung [kN/m²] nach Gl. (7-35)

z_a maximaler schneller Wasserspiegelabsunk [m], s. 7.1.2

β Böschungswinkel [°]

Δh_W Höhenunterschied [m] zwischen Grundwasserspiegel und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße: positiv, wenn der Grundwasserspiegel über dem Ruhewasserspiegel liegt

γ'_D Wichte der Deckschicht unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_{Di} Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb [kN/m³]

γ'_F Wichte des Filters unter Auftrieb [kN/m³]

γ_W Wichte des Wassers [kN/m³]

φ' effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

Der Nachweis einer Scherfuge innerhalb der Dichtung führt, bei Ansatz der Festigkeit der Dichtung als undränierte Scherfestigkeit $c_u \geq 5$ kN/m², im Vergleich zu Gl. (7-36) zu einer geringeren Deckschichtdicke. Daher ist der Nachweis des Abgleitens in der Dichtung i. d. R. nicht erforderlich.

7.4 Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung

Die globale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung ist nach /DIN 1054/ für den Grenzzustand GZ 1C mit den Verfahren nach /DIN 4084/ nachzuweisen. Folgende Situationen sind zu untersuchen:

- Betriebswasserstand BW bzw. Mittelwasser MW ohne Wasserspiegelabsunk mit den Teilsicherheitsbeiwerten für den Lastfall 1 nach /DIN 1054/
- Wasserspiegelabsunk infolge Schiffspassage mit Ansatz eines stationären Porenwasserdrucks, d. h. ohne Berücksichtigung des Porenwasserüberdrucks nach 7.1, mit den Teilsicherheitsbeiwerten für den Lastfall 2 nach /DIN 1054/; der stationäre Porenwasserdruck kann angesetzt werden z. B. als Absunk einwirkend
 - als hydrostatischer Überdruck auf den Gleitkörper oder
 - über eine Sickerlinie, die sich aus dem im Boden vorhandenen Ausgangswasserstand und dem in der Wasserstraße abgesenkten Wasserspiegel ergibt und dazwischen auf der Böschung unterhalb des Deckwerks verläuft

Hinweis: Auf den Ansatz von Porenwasserüberdrücken nach 7.1 kann hier beim Nachweis der globalen Standsicherheit verzichtet werden, da deren destabilisierende Wirkung auf die, für die globale Standsicherheit maßgeblichen, großen Bruchkörper deutlich geringer ist als auf die, beim Nachweis der lokalen Standsicherheit in 7.2, 7.3 und Kap. 8 betrachteten, relativ kleinen und flachen Bruchkörper.

Maßgebliche Hochwasserstände in staugeregelten oder frei fließenden Wasserstraßen und der zugehörige Lastfall sind im Einzelfall festzulegen, ggf. ist das schnelle Abfließen der Hochwasserwelle zu beachten.

Auf Betriebswegen sind ggf. Verkehrslasten zu berücksichtigen.

8 Hydraulische und geotechnische Bemessung von Deckschichten aus Wasserbausteinen mit Teilverguss

8.1 Hydraulische Bemessung

Aus Naturversuchen und nach den bisherigen Erfahrungen besitzen teilvergossene Deckschichten nach /MAV 1990/ einen ausreichenden Widerstand gegen alle bisher bekannten an Wasserstraßen auftretende hydraulischen Beanspruchungen. Eine hydraulische Bemessung erübrigt sich hierbei, solange die höchste auftretende Strömungsgeschwindigkeit $\leq 7,7$ m/s ist /LWI 1998/, was i. d. R. zutrifft.

Aus den bisherigen Erfahrungen kann eine ausreichende Sicherheit gegen Ankerwurf und Ankerfurchung im Bereich der Binnenschifffahrt abgeleitet werden, wenn die Deckschicht mindestens 40 cm dick ist und die Vergussmenge nach /MAV 1990/ gewählt wurde.

8.2 Geotechnische Bemessung

8.2.1 Allgemeines

Bei einer nach /MAV 1990/ hergestellten teilvergossenen Deckschicht kann vereinfachend mit einem Reibungswinkel der Gesamtscherfestigkeit von $\varphi'_D = 70^\circ$ gerechnet werden. Bei der Berechnung der Wichte des Deckwerks kann die Vergussmenge wie folgt mit eingerechnet werden.

Flächengewicht einer teilvergossenen Deckschicht unter Auftrieb g' [kN/m²]

$$g' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)d_D + \frac{m_v}{1000}(\gamma_v - \gamma_w) \quad (8-1)$$

mit

d_D Dicke der Deckschicht [m]

g' Flächengewicht einer teilvergossenen Deckschicht unter Auftrieb [kN/m²]

m_v Vergussstoffmenge [l/m²]

Hinweis: Nenner ist 1000 wg. Umrechnung l \rightarrow m³

n Porenanteil der unvergossenen Deckschicht [-] nach 7.2.4

γ_s Rohwichte der Wasserbausteine [kN/m³]

γ_v Wichte des Vergussstoffs [kN/m³], i. d. R. $\gamma_v = 22$ kN/m³

γ_w Wichte des Wassers [kN/m³]

8.2.2 Lokale Standsicherheit durchlässiger Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten

Bei der geotechnischen Bemessung von Deckschichten mit Teilverguss sind

- eine ausreichende Sicherheit gegen hydrodynamische Bodenverlagerung unter dem Deckwerk nach 7.2.6 und
- eine ausreichende Sicherheit der Böschung oberhalb des Deckwerks nach 7.2.9

nachzuweisen.

Anmerkung: Dynamische hydraulische Lasten auf Deckschichten aus Schiffsvorbeifahrten sind in ihrer Ausdehnung begrenzt. Bei teilvergossenen Deckschichten ist der innere Verbund ausreichend hoch, um Kräfte in seitliche unbelastete Bereiche abzutragen. Aus diesem Grund sind die Nachweise gegen Abgleiten und Abscheren durch die Deckschicht nicht erforderlich.

Eine Fußeinbindung (Fußverlängerung nach /MAR 2008/) ist aus Kolkenschutzgründen i. d. R. notwendig.

8.2.3 Lokale Standsicherheit dichter Deckwerke mit teilvergossenen Deckschichten

Bei der geotechnischen Bemessung von Deckschichten mit Teilverguss über einer Dichtungsschicht ist eine ausreichende Sicherheit

- gegen Abheben des Deckwerks nach 7.3.2 und
 - gegen Abgleiten des Deckwerks auf der Böschung nach 7.3.3
- nachzuweisen.

8.3 Nachweis der globalen Standsicherheit der wasserseitigen Böschung

Die globale Standsicherheit der Böschung ist nach 7.4 nachzuweisen.

9 Literaturverzeichnis

- /Abromeit 1997/* Abromeit, H.-U.
Ermittlung technisch gleichwertiger Deckwerke an Wasserstraßen und im Küstenbereich in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte der verwendeten Wasserbausteine
in: Mitteilungsblatt der BAW Nr. 75, S. 1 - 76
Eigenverlag, Karlsruhe 2004
- /BAW 2004/* Bundesanstalt für Wasserbau
Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB 2004)
Mitteilungsblatt Nr. 87
Eigenverlag, Karlsruhe 2004
- /BAW 2008/* Bundesanstalt für Wasserbau
GBBSoft – Software zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen
Software und Handbuch
Karlsruhe 2008
- /BAW 2009/* Bundesanstalt für Wasserbau
Fahrversuche am Wesel-Datteln-Kanal und Modellversuche bei der DST zur Frage der Sohlen- und Deckwerksstabilität bei Schifffahrt
unveröffentlicht
- /Binek, Müller 1991/* Binek, H., Müller, E.
Bestimmung der Wassertiefenabhängigkeit des Formfaktors eines Ein-Schrauben-Binnenschiffes
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V.
Eigenverlag, Duisburg 1991
- /Blaauw et al. 1984/* Blaauw, H. G.; van der Knaap, F. C. M.; de Groot, M. T.; Pilarczyk, K. W.
Design of bank protection of inland navigation fairways
International conference on flexible armoured revetments incorporating geotextiles
Publ. No. 320
London 1984
- /Blaauw, Kaa 1978/* Blaauw, H. G.; van de Kaa, E. J.
Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships
WL publication 202; 1978

- /Blokland 1994/* Blokland, T.
In-situ tests of current velocities and stone movements caused by a propeller jet against a vertical quay wall
Rotterdam public works 1994
- /BMV 1994/* Bundesministerium für Verkehr
Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen
Eigenverlag, Bonn 1994
- /BMV 1996/* Bundesministerium für Verkehr
Bundeswasserstraßenkarte
Drucksachenstelle der WSV
Hannover 1996
- /Bouwmeester 1977/* Bouwmeester, J.
Recent studies on push-towing as a base for dimensioning waterways
Publication No. 194, 39 p.
Delft Hydraulic Laboratory
Eigenverlag, Delft 1977
- /CUR-TAW 1992/* Centre for civil engineering research and codes (CUR),
Technical advisory committee on water defences (TAW)
Guide for design of river dikes
Volume 1 - upper river area
Report 142
Eigenverlag, Gouda/NL 1992
- /Dand, White 1978/* Dand, J. W.; White, W. R.
Design of navigation canals
Symposium on aspects of navigability of constraint waterways including
harbour entrances
Delft 1978
- /Dettmann 1998/* Dettmann, T.
**Ein Beitrag zur Berechnung von Fahrrinnenverbreiterungen in Kanal- und
Flusskrümmungen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten**
Binnenschifffahrt Nr. 23, S. 38 – 40
Dezember 1998
- /Dettmann, Jurisch 2001/* Dettmann, T.; Jurisch, R.
Beitrag zur Bemessung von Fahrrinnenbreiten in Kanälen und Flüssen
Binnenschifffahrt Nr. 6, S. 72 - 75
Juni 2001

- /Dietz 1973/* Dietz, J. W.
Sicherung der Flusssohle unterhalb von Wehren und Sperrwerken
Wasserwirtschaft 63 (1973) 3, S. 76 - 83
- /DIN 1054/* Deutsches Institut für Normung
Zulässige Belastung des Baugrunds
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN 4084/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Gelände- und Böschungsbruchberechnungen
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN 4085/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Berechnung des Erddrucks
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN EN 13383/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Wasserbausteine
Teil 1 und Teil 2
Beuth-Verlag, Berlin
- /DIN EN ISO 10319/* Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)
Geotextilien- Zugversuch am breiten Streifen
Beuth-Verlag, Berlin
- /Dittrich 1998/* Dittrich, A.
Wechselwirkungen Morphologie/Strömung naturnaher Fließgewässer
Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau und Kulturtechnik,
Universität Karlsruhe, Heft 198
Eigenverlag, Karlsruhe 1998
- /Ducker, Miller 1996/* Ducker, H. P.; Miller, C.
Harbour bottom erosion at berths due to propeller jets
Proceedings of the 11th International Harbour Congress
Antwerpen, 1996
- /DVPFIX 2002/* **Programmdokumentation DVPFIX**
Institut für Energie- und Umwelttechnik, Universität Rostock 2002

- /DVWK 1997/* Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., DVWK (Hrsg.)
Maßnahmen zur naturnahen Gewässerstabilisierung
DVWK Schriften, Heft 118
Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft mbH, Bonn 1997
- /EAK 1993/* Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG),
Hafenbautechnische Gesellschaft (HTG)
Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzbauwerken
Die Küste
Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co., Heide in Holstein 1993
- /EAK 2002/* Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT), Hafenbautechnische
Gesellschaft e.V. (HTG)
Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken
Die Küste, Heft 65, 2002
- /EAU 2004/* Hafenbautechnische Gesellschaft e. V. (HTG), Deutsche Gesellschaft für
Geotechnik e. V. (DGGT)
**Empfehlungen des Arbeitsausschusses “Ufereinfassungen”
Häfen und Wasserstraßen
EAU 2004**
10. Auflage
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 2005
- /EBGEO 1997/* Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)
**Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Beweh-
rungen aus Geokunststoffen**
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1997
- /Fuehrer, Römisch 1985/* Fuehrer, M.; Römisch, K.
**Dimensionierung von Sohlen- und Böschungsbefestigungen an Schiffahrts-
kanälen**
Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau
Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Nr. 47, Berlin 1985
- /Führböter et al. 1983/* Führböter, A.; Dette, H. H.; Jensen, J.
**Ergebnisse von Wind- und Schiffswellenmessungen an der Unterelbe in den
Jahren 1980/1981**
Bericht Nr. 546 (unveröffentlicht)
Leichtweiß-Institut, Universität Braunschweig
Eigenverlag 1983

- /Gates, Herbich 1977/* Gates, E. T.; Herbich, J. B.
Mathematical model to predict the behavior of deep-draft vessels in restricted waterways
Texas A and M University, Sea Grant College
Report TAMU-SG-77-206, 1977
- /Gaudio, Marion 2003/* Gaudio, R.; Marion, A.
Time evolution of scouring downstream of bed sills
Journal of Hydraulic Research
Vol. 41, No. 3 (2003), pp. 271 - 284
- /Horn 1928/* Horn, F.
Theorie des Schiffes
in: „Mechanik der Flüssigkeiten nebst technischen Anwendungsgebieten“
von Auerbach, F.; Hort, W.
S. 552-718
Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1928
- /Hudson 1959/* Hudson, R. Y.
Laboratory investigations of rubble mound breakwaters
Journal of Waterways and Harbours
ASCE, New York 1959
- /Jansen, Schijf 1953/* Jansen, P. Ph.; Schijf, J. B.
ohne Titel
PIANC's 18th International Navigation Congress
Section I - Communication I, pp. 175 - 197
Eigenverlag, Rom 1953
- /Kayser 2006/* Kayser, J.
**Neue Norm: Handhabung und Umsetzung in einer Steinbemessung
– Norm DIN EN 13383 für Wasserbausteine –**
Binnenschiffahrt, Heft 1 - 2, S. 60 - 63
Januar 2006
- /Köhler 1989/* Köhler, H.-J.
Messung von Porenwasserüberdrücken im Untergrund
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 66, S. 155 - 174
Eigenverlag, Karlsruhe 1989
- /Köhler 1993/* Köhler, H.-J.
The influence of hydraulic head and hydraulic gradient on the filtration process
in: "Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering"
Proceedings of the 1st International Conference 'Geofilters'
Karlsruhe 1992, pp. 225 - 240
A. A. Balkema Verlag, Rotterdam 1993

- /Köhler 1997/* Köhler, H.-J.
Boden und Wasser - Druck und Strömung
Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 76, S. 15 - 33
Eigenverlag, Karlsruhe 1997
- /Köhler, Koenders 2003/* Köhler, H.-J.; Koenders, M. A.
Direct visualization of underwater phenomena in soil-fluid interaction and analysis of the effects of an ambient pressure drop on unsaturated media
Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, Issue 1 (2003), pp. 69 - 78
- /Kriebel 2003/* Kriebel, D.
Development of unified description of ship generated waves
U. S. Section PIANC Annual Meeting
27. - 30. Oktober 2003, Portland, Oregon/USA
Passing Vessel Issues Workshop
- /Kuhn 1985/* Kuhn, R.
Binnenverkehrswasserbau
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1985
- /LWI 1998/* N.N.
Stabilität von verklammerten Deckwerken
Bericht Nr. 833
Leichtweiß-Institut für Wasserbau / TU Braunschweig, August 1998
- /MAG 1993/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendungen von geotextilen Filtern an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1993
- /MAK 1989/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1989
- /MAR 2008/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 2008
- /MAV 1990/* Bundesanstalt für Wasserbau
Merkblatt Anwendung von hydraulisch- und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen
Eigenverlag, Karlsruhe 1990

- /Maynord 2004/* Maynord, S. T.
Ship effects at the bankline of navigation channels
Proceedings of the ICE - Maritime Engineering, Vol. 157, Issue 2, 93 – 100
Ice virtual library, 2004
- /Maynord 2005/* Maynord, S. T.
Wave height from planing and semi-planing small boats
River Res. Applic. 21: 1 - 17 (2005)
Publiziert online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com)
- /Oosterveld, Oossanen 1975/* Oosterveld, M. W. C.; van Oossanen, P.
Further computer-analysed data of the Wageningen B-Screw Series
International shipbuilding progress, Vol 22, No. 251. July 1975, pp. 251 - 262
- /Peters 2002/* Peters, H.-E.
Stellungnahme und Vorschläge zur Abschätzung der Strahlgeschwindigkeit von Propellern und Düsenpropellern
Ausarbeitung im Auftrag der BAW (unveröffentlicht)
Rostock 2002
- /PIANC 1987a/* Permanent International Association of Navigation Congresses - PIANC (Hrsg.)
Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways
Report of the Working Group 4 of the Permanent Technical Committee I
Supplement to Bulletin No. 57
Eigenverlag, Brüssel 1987
- /Press, Schröder 1966/* Press, H.; Schröder, R.
Hydromechanik im Wasserbau
Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1966
- /PROFIX 2002/* **Programmdokumentation PROFIX**
Institut für Energie- und Umwelttechnik, Universität Rostock 2002
- /Przedwojski et al. 1995/* Przedwojski, B.; Blazejewski, R.; Pilarczyk, K. W.
River training techniques - fundamentals, design and application
Balkema, Rotterdam 1995

- /Römisch 1975/* Römisch, K.
Der Propellerstrahl als erodierendes Element bei An- und Ablegemanövern in Hafenbecken
Seewirtschaft Heft 7 (1975)
Berlin
- /Römisch 1989/* Römisch, K.
Empfehlungen zur Bemessung von Hafeneinfahrten
Technische Universität Dresden, Sektion Wasserwesen
Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 1, S. 2 - 84
Eigenverlag, Dresden 1989
- /Römisch 1994/* Römisch, K.
Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen
HANSA – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen
Nr. 9 / 1994 (131. Jg.), S. 231 - 234
- /RVW 2009/* Ministry of Transport, Public Works and Water Management (Ed.),
Broisma, J. U. (Ed.), Roelse, K. (Ed.)
Guidelines for Waterways
Eigenverlag, Rotterdam 2009
Originaltitel: Richtlijnen vaarwegen
2e gecorr.dr. 2006
ISBN 90-369-3630-6
- /Schäle, Mollus 1971/* Schäle, E.; Mollus, G.
Bildbericht über die Versuche auf Rhein und Main sowie in den Haltungen Hausen und Kriegenbrunn
Kanal- und Schifffahrtsversuche, 3. Folge
Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Duisburg 1971
- /Schokking 2002/* Schokking, L. A.
Bowthruster-induced damage
Master of Science Thesis
TU Delft 2002
- /Schuster 1952/* Schuster, S.
Untersuchungen über die Strömungs- und Widerstandsverhältnisse bei der Fahrt von Schiffen in beschränktem Wasser
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 1952
- /Söhngen 1992/* Söhngen, B.
Dimensionierung von Fahrrinnenquerschnitten im Rahmen der Planung von Staustufen
13. Duisburger Kolloquium für Schiffs- und Meerestechnik, Mai 1992

- /Söhngen, Tittizer 2009/* Söhngen, B.; Tittizer, T.
Vorlesungsskript Binnenwasserstraßen, Verkehrswasserbau und Ökologie
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Darmstadt
TU Darmstadt 2009
- /Söhngen et al. 2010/* Söhngen, B.; Pohl, M.; Gesing, C.
Bemessung von losen Schüttsteinen gegen schiffsinduzierte Strömungen und Wellen
Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden
Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 40, S. 137 ff.
Dresden 2010
- /Söhngen, Koll 1997/* Söhngen, B.; Koll, K.
Bemessung von Sohlendeckwerken unter starkem Strömungsangriff
in DVWK-Schrift 118, 1997
- /TLW 1997/* Bundesministerium für Verkehr
Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine
Eigenverlag, Bonn 1997
- /TLW 2003/* Bundesministerium für Verkehr
Technische Lieferbedingungen für Wasserbausteine
Eigenverlag, Bonn 2003
- /Verhey, Bogaerts 1989/* Verhey, H. J.; Bogaerts, M. P.
Ship waves and the stability of armour layers protecting slopes
9th International Harbour Congress
Antwerpen, Belgien, Juni 1989
Delft Hydraulics Publication No. 428 (von 1989)
- /Yosifov et al. 1986/* Yosifov, K.; Zlatev, Z.; Staneva, A.
Optimum characteristics equations for K-J ducted propeller design charts
Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, Selected Papers Volume 1, Book 1, Varna
1986, pp. 73 - 84

10 Nomenklatur

10.1 Abkürzungen

BF	Böschungsfuß
BinSchStrO	Binnenschifffahrtsstraßenordnung
BW	Betriebswasserstand
BWStr	Binnenwasserstraße(n)
CEMT	Europäische Verkehrsministerkonferenz
DEK	Dortmund-Ems-Kanal
DST	Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme
ES	Europaschiff
FGS	Fahrgastschiff
FKS	Flusskreuzfahrtschiff
Fkt.	Funktion von (...)
Gl(n).	Gleichung(en)
GMS	Großmotorgüterschiff
GW	Grundwasserstand
KA	Kanalachse
MAX {...}	Maximum von {...}
MLK	Mittellandkanal
MS	Motorschiff
MW	Mittelwasser
RHK	Rhein-Herne-Kanal
R-Profil	Rechteckprofil
RWS	Ruhewasserspiegel
SB	Schubboot
SV	Schubverband
T-Profil	Trapezprofil
üGMS	überlanges Großmotorgüterschiff
WDK	Wesel-Datteln-Kanal
Wsp.	Wasserspiegel
1D	eindimensional
2SV/4SV	2er bzw. 4er Schubverband

10.2 Symbole

a	[m]	größte Abmessung eines Wasserbausteins
a	[-]	Exponent zur Beschreibung der Strahlausbreitungssituation
a	[-]	Porenwasserdruckparameter

a_p	[m]	Abstand der Propellerachsen eines Zweischaubers zueinander
A	[-]	Beiwert zur Beschreibung der Strahlausbreitungssituation
A	[m]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
A	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
A	[m ²]	Fließquerschnitt, Gewässerquerschnitt, Kanalquerschnitt
A'	[m ²]	Querschnittsfläche zwischen Schiffsachse und Ufer
A_0	[m ²]	Querschnittsfläche an der engsten Einschnürung hinter dem Propeller
A_A	[m ²]	Anströmfläche vor dem Propeller
A_E	[m ²]	Eintrittsfläche in die Propellerebene
A_K	[m ²]	unmodifizierte Querschnittsfläche des Kanals
$A_{K,\text{äqui}}$	[m ²]	äquivalenter Kanalquerschnitt
A_M	[m ²]	eingetauchter Hauptspantquerschnitt des Schiffes
$A_{S,\text{äqui}}$	[m ²]	äquivalente Schiffsquerschnittsfläche
$A_{S,B}$	[m ²]	Schiffsquerschnittsfläche am Bug
$A_{S,\text{eff}}$	[m ²]	effektive eingetauchte Querschnittsfläche des Schiffes, effektiver Schiffsquerschnitt unter Berücksichtigung von Grenzschichteffekten an Bug und Heck
$A_{S,\text{eff},B}$	[m ²]	effektive eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Bug
$A_{S,\text{eff},D}$	[m ²]	fiktiv vergrößerter, effektiver eingetauchter Schiffsquerschnitt bei Fahrt mit Drift
$A_{S,\text{eff},H}$	[m ²]	effektive eingetauchte Schiffsquerschnittsfläche am Heck
$A_{S,H}$	[m ²]	Schiffsquerschnittsfläche am Heck
A_W	[-]	Wellenhöhenbeiwert abhängig von Schiffsform, Schiffsabmessungen, Abladetiefe und Wassertiefe
b	[1/m]	Porenwasserdruckparameter
b	[m]	mittlere Abmessung eines Wasserbausteins
b^*	[1/m]	Porenwasserdruckparameter für $t_a = t_a^* = 5s$
b_E	[m]	Einflussbreite des Rückströmungsfeldes, äquivalente Kanalbreite bei Flachwasserfahrt
b_F	[m]	Fahrrinnenbreite
b_m	[m]	mittlere Wasserspiegelbreite im Bereich der Wasserspiegelanhebung/-absenkung
b_r	[m]	rechnerische Kanalbreite, rechnerische Gewässerbreite
$b_{r,\text{äqui}}$	[m]	rechnerische Breite des äquivalenten Kanalprofils [m]
b_S	[m]	Kanalsohlenbreite, Sohlenbreite
b_{WS}	[m]	Wasserspiegelbreite
$b_{WS,\text{äqui}}$	[m]	äquivalente Wasserspiegelbreite
B	[m]	Schiffsbreite
B	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
B	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
B^*	[-]	Belastungsbeiwert

B_1	[m]	Breite der Einzelfahrspur
B_{85}^*	[-]	Stabilitätsbeiwert auf geneigter Böschung
$B_{85,0}^*$	[-]	Stabilitätsbeiwert allgemein
B_B	[m]	Schiffsbreite am Bug
B'_B	[-]	Stabilitätsbeiwert
B_B^*	[-]	Beiwert für Aufttrittshäufigkeit
B_H	[m]	Schiffsbreite am Heck
B_m	[m]	mittlere Schiffsbreite zwischen Bug und Heck
B_S	[-]	Beiwert bei Strahlgriff auf ebener Sohle
$B_{S,Bö}$	[-]	Beiwert bei Strahlgriff auf Uferböschung
BW	[m+NN]	Betriebswasserstand
BW_u	[m+NN]	unterer Betriebswasserstand
c	[m]	kleinste Abmessung eines Wasserbausteins
c	[m/s]	Wellenfortschrittsgeschwindigkeit, Wellengeschwindigkeit
c_B	[-]	Blockkoeffizient, Verhältnis zwischen tatsächlichem Volumen des Schiffsrumpfes zum Volumen des umhüllenden Quaders $L \cdot B \cdot T$
c'	[kN/m ²]	effektive Kohäsion des Bodens, dauerhaft wirksame Kohäsion
c_0	[m/s]	Stauwellengeschwindigkeit
c'_{AB}	[kN/m ²]	Kohäsion/Adhäsion zwischen Zugelement und Boden über dem abgesenkten Wasserspiegel
c_F	[-]	fahrdynamische Konstante
c_u	[kN/m ²]	Festigkeit der Dichtung als undrainierte Scherfestigkeit
C	[-]	Konstante zur näherungsweisen Beschreibung der Absinkzeit
C	[-]	Beiwert (für induzierte Anfangsgeschwindigkeit ausgehend von der Maschinenleistung)
C	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
C'	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von E'_{ph} und e'_{ph}
C'_1	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
C'_2	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
C_A	[-]	Konstante für den Wellenaufbau
$C_{Bö}$	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des Böschungseinflusses
C_H	[-]	Faktor für den Einfluss von Schiffstyp, Abladung und Vertrimmung und Wasserspiegellängsgefälle
C_{Isb}	[-]	Faktor nach Isbash
C_m	[-]	Beiwert für die Belastungsdauer
C_{May}	[-]	Koeffizient zur Berücksichtigung des Trimmwinkels
d_0	[m]	Strahldurchmesser am Ort der maximalen Kontraktion
d_A	[m]	Strahldurchmesser im Anströmbereich

d_D	[m]	Dicke der Deckschicht (gemessen senkrecht zur Oberfläche)
d_{DF}	[m]	Dicke der Steinschicht in der Fußvorlage
d_{Di}	[m]	Dicke der Dichtungsschicht
d_{Do}	[m]	Dicke der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
d_F	[m]	Dicke des Filters
d_{FF}	[m]	Dicke des Filters in der Fußvorlage
d_{Fo}	[m]	Dicke eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
d_{krit}	[m]	kritische Tiefe der Bruchfuge, Tiefe der kritischen Bruchfuge, Tiefe einer böschungsparellen Bruchfläche
d_{kritB}	[m]	kritische Tiefe der Bruchfuge zur Verhinderung von hydrodynamischen Bodenverlagerungen
d_x	[m]	Durchmesser des Propellerstrahlkegels
D	[m]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
D	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
D	[m]	Korndurchmesser, Steingröße, Siebdurchmesser
D	[m]	Propellerdurchmesser, Rohrdurchmesser des Bugstrahlruders
D_{10}	[m]	Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang
D_{50}	[m]	erforderliche Steingröße, Korndurchmesser bei 50 % Massendurchgang der Summenlinie
D_{60}	[m]	Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang
D_{85}	[m]	Korndurchmesser bei 85 % Siebdurchgang
D_{90}	[m]	Korndurchmesser bei 90 % Siebdurchgang
D_i	[m]	repräsentativer Korndurchmesser der Klasse i, entspricht dem geometrischen Mittel aus D_{io} und D_{iu}
D_{io}	[m]	Obergrenze der Korngrößenklasse i (Quadratlochweite des Siebes)
D_{iu}	[m]	Untergrenze der Korngrößenklasse i (Quadratlochweite des Siebes)
D_n	[m]	nominale Steingröße
D_{n50}	[m]	erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser, nominale Steingröße
D_o	[m]	obere Klassengrenze des Steindurchmessers
D_{oKIGr}	[m]	Durchmesser eines Steins, der der oberen Grenze einer Steinklasse entspricht
D_u	[m]	untere Klassengrenze des Steindurchmessers
D_{uKIGr}	[m]	Durchmesser eines Steins, der der unteren Grenze einer Steinklasse entspricht
D_x	[m]	Korndurchmesser bei x % Siebdurchgang
e	[-]	Eulersche Konstante $e \approx 2,718$
e'_{ph}	[kN/m ²]	horizontale Ordinate des passiven Erddrucks
$erf D_{50}$	[cm]	erforderlicher Steindurchmesser bei 50 % Siebdurchgang
$erf D_{85}$	[cm]	erforderlicher Steindurchmesser bei 85 % Siebdurchgang
$erf \tau$	[kN/m ²]	erforderliche Schubspannung
$erf \tau_A$	[kN/m ²]	erforderliche zusätzliche stützende Schubspannung
$erf \tau_F$	[kN/m ²]	erforderliche Schubspannung bei einer Fußspundwand

E	[-]	Beiwert zur Charakterisierung von Heckform und Ruderanordnung
E	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
E'_a	[kN/m]	aktiver Erddruck im Boden unter der Böschungssicherung
E'_p	[kN/m]	passiver Erddruck, Erdwiderstand
E'_{ph}	[kN/m]	horizontaler Anteil des passiven Erddrucks vor der Fußvorlage
E_S	[MN/m ²]	Steifemodul des Bodens
f	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
f^*	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
\tilde{f}	[-]	Formparameter
f_B	[-]	Faktor der Einflussbreite abhängig vom Schiffstyp
f_{cr}	[-]	Geschwindigkeitsbeiwert
f_N	[-]	Faktor zur gewählten Propellerdrehzahl
f_P	[-]	Faktor zur einsetzbaren Maschinenleistung
f_{red}	[-]	Reduktionsfaktor für Energieverluste beim Wellenaufbau, Reduzierungsfaktor für den zu berücksichtigenden Anteil der Sekundärwellenhöhe an der Heckwellenhöhe
f_λ	[-]	Wellenlängenbeiwert
$f_{\Delta h_{WA,B}}$	[-]	Faktor zur Reduzierung des Einflusses der Wasserspiegelanspannung vor dem Bug
F	[kN/m]	Fußstützkraft, Kraft aus Deckwerk
F	[kN/m ²]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
F_1	[-]	Faktor zum maximalen Wasserspiegelabsink im Uferbereich am Bug
F_{F2}	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max T_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
Fr	[-]	Froude-Zahl im Heckbereich
\tilde{Fr}	[-]	Froude-Zahl, gebildet mit der maximalen Heckwellenhöhe anstelle der Wassertiefe
Fr_h	[-]	Froude-Zahl, bezogen auf die Wassertiefe h
Fr_∇	[-]	Froude-Zahl, bezogen auf das verdrängte Wasservolumen ∇
$Fr_{\nabla 1}$	[-]	Froude-Zahl, bezogen auf das verdrängte Wasservolumen ∇ zu Beginn des Übergangsbereichs
$Fr_{\nabla 2}$	[-]	Froude-Zahl, bezogen auf das verdrängte Wasservolumen ∇ zu Beginn des voll ausgebildeten Gleitens
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g'	[kN/m ²]	Kraftwirkung des Flächengewichts der Deckschicht, erforderliches Flächengewicht der Deckschicht
g'	[m/s ²]	relative Dichte
G	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung der erforderlichen Dicke der Deckschicht für Bruchmechanismus 1
G	[kg]	Steinmasse
G'	[kN]	Gewichtskraft des Bodenkörpers unter Auftrieb

G'	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von E'_{ph} und e'_{ph}
G'_1	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
G'_2	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
G_i	[kg]	repräsentative Steinmasse der Klasse i , entspricht dem geometrischen Mittel aus G_{io} und G_{iu}
G_{io}	[kg]	Obergrenze der Steinmasse der Klasse i
G_{iu}	[kg]	Untergrenze der Steinmasse der Klasse i
G_{50}	[kg]	erforderliche mittlere Steinmasse, Steinmasse bei 50% Massendurchgang der Summenlinie
G_{70}	[kg]	Steinmasse bei 70% Massendurchgang der Summenlinie
G_{100}	[kg]	Steinmasse bei 100% Massendurchgang der Summenlinie
G_o	[kg]	obere Klassengrenze der Steinmasse
G_{oKIGr}	[kg]	Masse eines Steins, der der oberen Grenze einer Steinklasse entspricht
G_u	[kg]	untere Klassengrenze der Steinmasse
$G_{Ük}$	[kg]	Masse eines Steins, der dem maximal zulässigen Überkorn einer Steinklasse entspricht
h	[m]	Wassertiefe, Kanalwassertiefe, örtliche Wassertiefe, mittlere Wassertiefe
h'	[m]	Fahrrinntiefe
h_{Kolk}	[m]	Kolk­tiefe unter der Gewässersohle
h_m	[m]	mittlere Wassertiefe
h_p	[m]	Höhenlage der Propellerachse über der Sohle
h_W	[m]	Wassertiefe bei Ruhewasserspiegel
h_x	[m]	Wassertiefe im engsten Fließquerschnitt
H	[m]	Wellenhöhe, Schiffswellenhöhe, Bemessungswellenhöhe
H_B	[m]	Schiffswellenhöhe am Bug
H_{Bem}	[m]	Bemessungswellenhöhe
H_H	[m]	Schiffswellenhöhe am Heck
H_s	[m]	signifikante Wellenhöhe, Bemessungswellenhöhe
H_{Sek}	[m]	Sekundärwellenhöhe, Höhe der zusätzlichen Sekundärwelle
$H_{Sek,gl}$	[m]	Sekundärwellenhöhe bei Fahrt mit Gleitgeschwindigkeit
$H_{Sek,q}$	[m]	Höhe der reinen Sekundärheckquerwelle
$H_{u,Bug}$	[m]	Maximalwert der Bugwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt
$H_{u,Heck}$	[m]	Maximalwert der Heckwellenhöhe am Ufer bei exzentrischer Fahrt
$H_{u,Heck,StBem}$	[m]	Heckwellenhöhe in Ufernähe, relevant für die Steingrößenbemessung
i_p	[kN/m³]	Strömungsdruck
J	[-]	Propellerfortschrittsgrad
k	[-]	reziprokes Querschnittsverhältniss, blockage coefficient

k	[m/s]	Durchlässigkeit des Bodens, Wasserdurchlässigkeit des Bodens, hydraulische Durchlässigkeit des Baugrundes
k	[-]	Faktor für C_{B0}
k_{Str}	[m ^{1/3} /s]	mittlere Stricklerrauheit des Querprofils
$k_{Str,u}$	[m ^{1/3} /s]	Stricklerrauheit des Ufers, d.h. des Deckwerks
K	[-]	Neigungsbeiwert
K_l	[-]	Längsneigungsbeiwert
K_q	[-]	Querneigungsbeiwert
K_{SS}	[m]	äquivalente Sandrauheit der Schiffshaut
K_T	[-]	Schubbeiwert des Propellers für $J = 0$
$K_{T,DP}$	[-]	Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J = 0$
$K_{T,DPJ}$	[m]	Schubbeiwert eines Propellers mit Düse für $J \neq 0$
K_{TJ}	[-]	Schubbeiwert eines Propellers ohne Düse für $J \neq 0$
I_u	[m]	benetzter Umfang
L	[m]	Schiffslänge, Länge des Sportbootes
L	[m]	Wandabstand der Propellerebene, Abstand Austrittsfläche Bugstrahlruder – Kaimauer bzw. Böschung
L	[m]	Wellenlänge
L	[m]	Steinlänge, größte Abmessung eines Wasserbausteins nach DIN 13383
L_{50}	[kg]	Steinlänge bei 50% Massendurchgang der Summenlinie
L_{90}	[kg]	Steinlänge bei 90% Massendurchgang der Summenlinie
L_{100}	[kg]	Steinlänge bei 100% Massendurchgang der Summenlinie
L_{AM}	[m]	Länge der Absunkmulde
L_B	[m]	Abstand des Bugs vom Hauptsspantanzug
L_{eff}	[m]	effektive Schiffslänge
L_{Fu}	[m]	Länge der Fußvorlage
L_H	[m]	Entwicklungslänge der Grenzschicht zwischen Bug und Hauptspantende, Abstand des Bugs vom Hauptspantende
L_o	[m]	Länge der Böschungssicherung über dem abgesenkten Wasserspiegel
$L_{oK/Gr}$	[m]	Länge eines Steins, der der oberen Grenze einer Steinklasse entspricht
L_{pris}	[m]	Länge des Fahrzeugbereiches mit weitgehend prismatischem Querschnitt
L_u	[m]	Länge der Böschungssicherung unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels, Unterwasserlänge der Böschungssicherung
$L_{Ük}$	[m]	Länge eines Steins, der dem maximal zulässigen Überkorn einer Steinklasse entspricht
L_W	[m]	wellenbildende Schiffslänge
m	[-]	Böschungsneigung (Achtung: anders definiert als die Steigung einer Geraden)
$m_{K,äqui}$	[-]	äquivalente Böschungsneigung
m_{lks}	[-]	Böschungsneigung am linken Ufer
m_{rts}	[-]	Böschungsneigung am rechten Ufer
m_v	[l/m ²]	Vergussmenge

$\max L_{Fu}$	[m]	maximal zulässige Länge der Fußvorlage
$\max v_{za}$	[m/s]	maximale Absunkgeschwindigkeit
$\max \tau_{F1}$	[kN/m ²]	maximal erreichbare äquivalente Schubspannung für Bruchmechanismus 1
$\max \tau_{F2}$	[kN/m ²]	maximal übertragbare äquivalente Schubspannung bei einer Fußvorlage bzw. Fußeinbindung
$\max \tau_{F2,a}$	[kN/m ²]	äußere, maximal übertragbare äquivalente Schubspannung bei einer Fußvorlage
$\max \tau_{F2,i}$	[kN/m ²]	innere, maximal übertragbare äquivalente Schubspannung bei einer Fußvorlage
$\min d_D$	[m]	mindestens erforderliche Einbaudicke, Minstdicke der Deckschicht
$\min L_{Fu}$	[m]	minimal mögliche Länge der Fußvorlage
n	[-]	Hohlraumanteil, Porenanteil des Mineralkornfilters bzw. des (unvergossenen) Deckwerks
n	[1/min]	Propellerdrehzahl, Schraubendrehzahl des Bugstrahlruders
n	[-]	Querschnittsverhältnis
n_{aqui}	[-]	äquivalentes Querschnittsverhältnis
n_{Nenn}	[1/min]	Nennrehzahl des Propellers
p	[bar; Pa]	Druck
p_0	[bar; Pa]	Druck
p_1	[bar; Pa]	Druck
p_2	[bar; Pa]	Druck
P	[m]	Konstruktionssteigung
P_{Bug}	[kW]	installierte Leistung des Bugstrahlruders
$P_{d,Nenn}$	[kW]	Nennleistung
r_x	[m]	radialer Abstand des Auftreffpunktes von der Strahlachse in der Entfernung x von der Propellerebene
\tilde{r}	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
R	[m]	innerer, kleinerer Radius einer gekrümmten Fahrspur
R'_d	[m]	vertikale Erstreckung des Deckwerks unter dem Ruhewasserspiegel
RWS	[m+NN]	Ruhewasserspiegel
S	[-]	Sättigungsgrad des Bodens
SF	[-]	Formfaktor für Wasserbausteine
t	[s]	Zeit
t	[m]	Tiefe unter der Gewässersohle
t_0	[s]	Startzeitpunkt
t_a	[s]	Absunkzeit allgemein
t_a^*	[s]	Absunkzeit $t_a = t_a^* = 5 \text{ s}$
$t_{a,B}$	[s]	Absunkzeit am Bug
$t_{a,B,Sek}$	[s]	Absunkzeit der maximalen Sekundärwelle am Bug

$t_{a,H}$	[s]	Absinkzeit am Heck
t_f	[m]	Kielfreiheit
t_F	[m]	Tiefe der Fußeinbindung / Tiefe der Fußspundwand / Tiefe der gesamten Fußvorlage
t_{fl}	[m]	Flottwasser
$t_{fl,min}$	[m]	Mindestflottwasser
t_k	[m]	Kolkentiefe vor dem Fuß des Deckwerks an der Gewässersohle, Kolkentiefe
t_{krit}	[m]	kritische Tiefe unter der Gewässersohle
t_v	[m]	Tauchtiefe
t_∞	[s]	Startzeitpunkt
T	[s]	mittlere Wellenperiode, Wellenperiode
T	[m]	Tiefgang, Tauchtiefe am Hauptspant
T_B	[m]	Schiffstiefgang im Bugbereich
T_H	[m]	Schiffstiefgang im Heckbereich
T_m	[m]	mittlerer Schiffstiefgang zwischen Bug und Heck
u	[m]	Uferabstand (Mitte Schiff-Uferlinie bei RWS)
u'	[m]	Abstand Schiffswand – Uferlinie
$u'_{\tilde{u}}$	[m]	Abstandsbereich [m], in dem die Überlagerung der Heckquerwelle des Primärwellensystems mit der Bug-Sekundärwelle erfolgt
u^*	[m]	Uferabstand beim Auftreffen der ersten Interferenzwellengruppe auf das Ufer
U_b	[kN/m]	Resultierende des Porenwasserüberdrucks
u_{eff}	[m]	effektiver Uferabstand
u_{max}	[m/s]	maximale Geschwindigkeit der Wiederauffüllungsströmung in Höhe der Deckwerkssteine
$u_{max,B}$	[m/s]	Bemessungsgeschwindigkeit in der Wiederauffüllungsströmung
u_r	[m]	rechnerischer Uferabstand, Abstand zum rechnerischen Ufer
$u_{r,lks}$	[m]	Abstand zum linken Ufer im rechnerischen Kanalprofil
$u_{r,max}$	[m]	maximaler Uferabstand im rechnerischen Profil
$u_{r,min}$	[m]	minimaler Uferabstand im rechnerischen Profil
$u_{r,rts}$	[m]	Abstand zum rechten Ufer im rechnerischen Kanalprofil
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl der Steinschüttung
U_v	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von E'_{ph} und e'_{ph}
U_{v1}	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
U_{v2}	[kN/m]	Hilfsvariable zur Berechnung von $\max \tau_{F2}$ für Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung
v	[m/s]	Geschwindigkeit allgemein
v_0	[m/s]	induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J = 0$
v_{0J}	[m/s]	induzierte Anfangsgeschwindigkeit bei $J > 0$
v_A	[m/s]	Anströmgeschwindigkeit des Propellers
v_{Bmax}	[m/s]	maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls für $J = 0$
v_{Bmax1}	[m/s]	maximale Sohlgeschwindigkeit im Auftreffpunkt des Propellerstrahls für $J \neq 0$

$v_{kl,bem}$	[m/s]	Fließgeschwindigkeit in Sohl- bzw. Deckwerksnähe
v_{krit}	[m/s]	kritische Schiffsgeschwindigkeit
v_m	[m/s]	mittlere Fließgeschwindigkeit als Tiefenmittel im Schiffspfad
v_{max}	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit aus Rückströmung und Fließgeschwindigkeit in Ufernähe
$v_{max,S}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle ohne Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes
$v_{max,S,Berg}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes bei der Bergfahrt
$v_{max,S,Tal}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle unter Berücksichtigung des umgebenden Strömungsfeldes bei der Talfahrt
$v_{max,S,K}$	[m/s]	maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle am Fuß der Kaimauer
$v_{max,S,xK}$	[m/s]	veränderte maximale Strömungsgeschwindigkeit an der Sohle nach Umlenkung im Abstand x_K von der Kaimauer
$v_{Nach.Bem}$	[m/s]	Nachlaufströmung in Sohlnähe
v_P	[m/s]	Geschwindigkeit in der Propellerebene
$\bar{v}_{rück}$	[m/s]	mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit, in Längs- und Querrichtung gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{rück,u}$	[m/s]	mittlere Rückströmungsgeschwindigkeit im Uferbereich, in Längsrichtung am Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{rück,u,rts}$	[m/s]	in Längsrichtung am rechten Ufer gemittelte Rückströmungsgeschwindigkeit
$\hat{v}_{rück}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit
$\hat{v}_{rück,u,Bug}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Bug im Uferbereich
$\hat{v}_{rück,u,Heck}$	[m/s]	maximale Rückströmungsgeschwindigkeit am Heck im Uferbereich
v_S	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
v_{SdW}	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser
$v_{S,gl}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit
$v_{S,gl1}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit im Übergang von der Verdrängerfahrt zum Gleiten
$v_{S,gl2}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit im Übergang zum voll ausgebildeten Gleiten
v_{Str}	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Querschnitt
$v_{Str,Ufer}$	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit ohne Schifffahrtseinfluss in Böschungsnähe
$v_{SüG}$	[m/s]	Schiffsgeschwindigkeit über Grund
v_{xmax}	[m/s]	Zentralgeschwindigkeit, maximale axiale Strömungsgeschwindigkeit
v_{xr}	[m/s]	Strahlgeschwindigkeit relativ zum Schiff im Abstand des Radius r_x von der Strahlachse
v_{xr1}	[m/s]	Strahlgeschwindigkeit an der Sohle bzw. am Ufer unter Berücksichtigung der Schiffsgeschwindigkeit
v_{za}	[m/s]	Absunkgeschwindigkeit des Wasserspiegels
\bar{v}_{za}	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit
$\bar{v}_{za,Bug}$	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit am Bug
$\bar{v}_{za,Heck}$	[m/s]	mittlere Absunkgeschwindigkeit am Heck
v_{zul}	[m/s]	zugelassene Geschwindigkeit nach BinSchStrO

$vorh D_{50}$	[cm]	vorhandener Steindurchmesser bei 50 % Siebdurchgang der mittleren Kornverteilungskurve
$vorh D_{85}$	[cm]	vorhandener Steindurchmesser bei 85 % Siebdurchgang der mittleren Kornverteilungskurve
w	[-]	Nachstromziffer
x	[m]	Entfernung von der Propellerebene in Strahlachse, Entfernung von der Austrittsseite des Bugstrahlruders, Entfernung entlang der Strahlachse ab Düsenaustritt über Kaimauer und Sohle
x	[m]	Zuschlag für verschiedene Steinmaterialien
X	[%]	Massenprozent, Massenanteil
x_{gr}	[m]	Entfernung, ab der die Strahlausbreitung behindert wird
x_{krit}	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
\tilde{x}_{krit}	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
x_K	[m]	Abstand des umgelenkten Strahls auf der Sohle ab Kaimauer
x_S	[m]	Entfernung vom Drehpunkt der Propellerebene auf der Sohle
$x_{S,max}$	[m]	Lage der maximalen Sohlgeschwindigkeit hinter dem Drehpunkt der Propellerebene
y	[m]	Abstand des gefahrenen Kursweges von der Kanalachse, Abstand der Kurswegachse von der Kanalachse
y_{krit}	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
z	[-]	Flügelzahl eines Propellers
z	[m]	Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche
z	[m]	Tiefe unterhalb der Böschungsoberfläche bzw. unterhalb der Gewässersohle, normal zum Gewässerbett
z_a	[m]	maximaler schneller Wasserspiegelabsunk, Absunk
$z_{a,B}$	[m]	maximaler schneller Wasserspiegelabsunk für den maßgebenden Bugbsunk
$z_{a,H}$	[m]	maximaler schneller Wasserspiegelabsunk für den maßgebenden Heckabsunk
z_{AL}	[m]	(Wellen-) Auflaufhöhe
$z_{AL,0}$	[m]	(Wellen-) Auflaufhöhe für $f_{red} = 1$
$z_{AL,St}$	[m]	Wellenaufbauhöhe auf Steinschüttungen
Z	[kN/m]	Zugkraft in einer Deckwerksaufhängung
α	[°]	äußerer Strahlbegrenzungswinkel
α_1	[-]	Korrekturbeiwert zur Beschreibung der Nähe zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit
α_0	[°]	Winkel zwischen Propellerachse und Strahlachse
α_B	[°]	durchschnittlicher Ablenkungswinkel
α_K	[°]	Kelvinscher Winkel ($\alpha_K \approx 19,47^\circ$)
α_l	[°]	Längsneigungswinkel
α_q	[°]	Querneigungswinkel

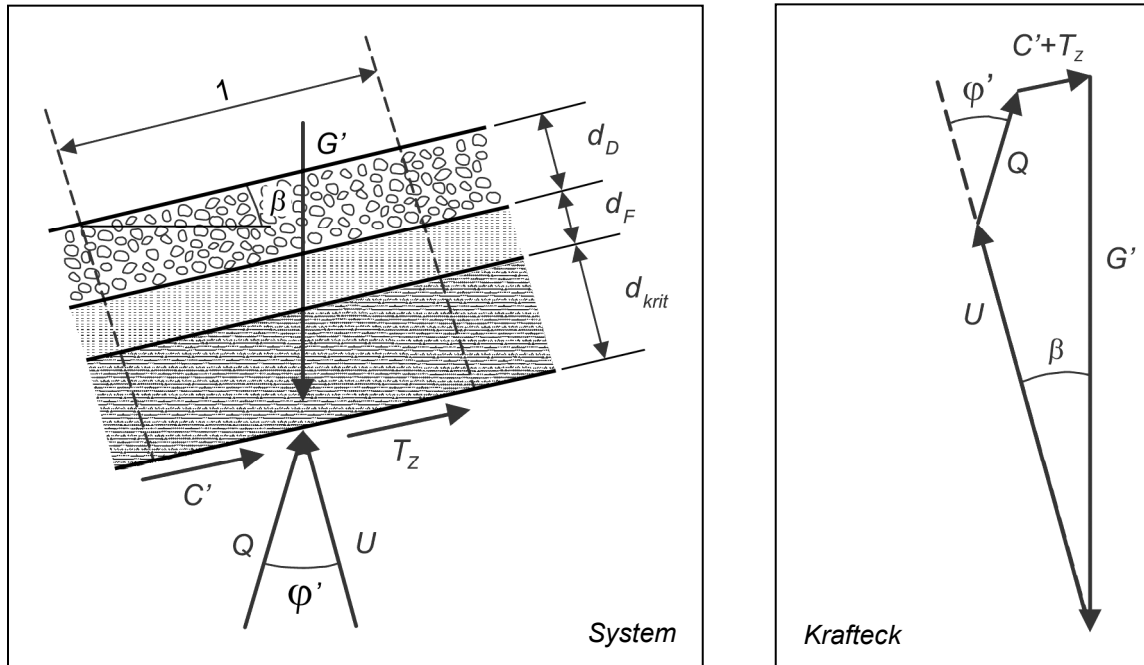
β	[°]	Böschungswinkel, Böschungswinkel oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
β	[-]	Hilfsvariable zur Berechnung der kritischen Schiffsgeschwindigkeit
β_D	[°]	Driftwinkel
β_K	[°]	Winkel zwischen Kamm der Sekundärschrägwellen und Uferlinie (meist: $\beta_K = 54,74^\circ$)
β_{St}	[°]	Winkel zwischen Strahlachse und Böschungsnormale (Angriffswinkel)
β_W	[°]	Anlaufwinkel zwischen Wellenkammorthogonaler und Böschungsfalllinie, Winkel zwischen Wellenkamm der Sekundärschrägwelle und Schiffsachse bzw. Uferlinie
β_λ	[-]	Beiwert zur wellenbildenden Schiffslänge
γ'	[kN/m³]	Wichte des Bodens unter Auftrieb
γ_A	[-]	Sicherheit gegen Auftrieb
γ_B	[-]	Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Bugbereich
γ'_D	[kN/m³]	Wichte der Deckschicht unter Auftrieb
γ'_{DF}	[kN/m³]	Wichte der Deckschicht in der Fußvorlage unter Auftrieb
γ'_{Di}	[kN/m³]	Wichte des Dichtungsmaterials unter Auftrieb
γ_{Do}	[kN/m³]	Wichte der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
γ_F	[kN/m³]	Wichte des Filters
γ'_F	[kN/m³]	Wichte des (Korn-) Filters unter Auftrieb
γ'_{FF}	[kN/m³]	Wichte des Filters in der Fußvorlage unter Auftrieb
γ_{Fo}	[kN/m³]	Wichte eines mineralischen Filters oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels
γ_H	[-]	Völligkeitsgrad des Schiffsquerschnitts im Heckbereich
γ_S	[kN/m³]	Rohwichte der Wasserbausteine
γ_V	[kN/m³]	Wichte des Vergussstoffs
γ_W	[kN/m³]	Wichte des Wassers
δ	[°]	Trimmwinkel
δ_a	[°]	Wandreibungswinkel (aktive Seite)
δ_G	[m]	Grenzschichtabstand
δ_p	[°]	Wandreibungswinkel (passive Seite)
δ_{1H}	[m]	Verdrängungsdicke im Heckbereich
δ_v	[m]	Grenzschichtdicke des Rückströmungsfeldes
ΔA	[m²]	Querschnittsreduzierung im Kanal infolge Schiffsquerschnitt und Absenk
ΔG_i	[kg]	Gewicht aller Einzelsteine einer Korngrößenklasse i
$\Delta \bar{h}$	[m]	über die Kanalbreite gemittelte maximale Wasserspiegelabsenkung im engsten Durchflussquerschnitt, mittlerer Wasserspiegelabsenk nach 1D-Kanaltheorie, in Längs- und Querrichtung gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \hat{h}_{Bug}$	[m]	Bugabsenk
$\Delta \hat{h}_{Heck}$	[m]	Heckabsenk

$\Delta \bar{h}_{\text{krit}}$	[m]	mittlerer Wasserspiegelabsenk bei kritischer Schiffsgeschwindigkeit
$\Delta H_{\text{s, oWI}}$	[m]	Wellenhöhenanteil oberhalb der Wasserlinie
Δh_{Sek}	[m]	maximale Wasserspiegelhebung des Sekundärwellensystems
$\Delta \bar{h}_{\text{u}}$	[m]	in Längsrichtung am Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \bar{h}_{\text{u, Bug}}$	[m]	gemittelter Wasserspiegelabsenk am Ufer im Bugbereich bei mittiger Fahrt
$\Delta \hat{h}_{\text{u, Bug}}$	[m]	maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Bug ohne Exzentrizitätseinfluss
$\Delta \bar{h}_{\text{u, lks}}$	[m]	in Längsrichtung am linken Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
$\Delta \bar{h}_{\text{u, Heck}}$	[m]	gemittelter Wasserspiegelabsenk am Ufer im Heckbereich bei mittiger Fahrt
$\Delta \hat{h}_{\text{u, Heck}}$	[m]	maximaler Wasserspiegelabsenk im Uferbereich am Heck ohne Exzentrizitätseinfluss
$\Delta \bar{h}_{\text{u, rts}}$	[m]	in Längsrichtung am rechten Ufer gemittelte Wasserspiegelabsenkung
Δh_{W}	[m]	Höhenunterschied zwischen Grundwasser- und Ruhewasserspiegel in der Wasserstraße
$\Delta h_{\text{WA, B}}$	[m]	Wasserspiegelanspannung vor dem Bug
Δp	[bar; Pa]	Druckdifferenz
Δt	[m]	dynamische Einsinktief (Squat)
Δt_{k}	[m]	Höhenunterschied zwischen Filterunterseite und Sohle des Kolks
Δu	[kN/m ²]	Porenwasserüberdruck
Δu	[m]	zusätzlicher Uferabstand in Bezug zum Uferabstand am Schiffsbug
ϑ_{p}	[°]	Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils im Boden unmittelbar vor der Fußvorlage
ϑ_{DF}	[°]	Gleitflächenwinkel des passiven Erddruckkeils innerhalb der Fußvorlage
λ_{q}	[m]	Wellenlänge der Querwellen, Wellenlänge der Heckquerwelle
λ_{s}	[m]	Wellenlänge der Schrägwelle
ξ	[-]	Brecherkennzahl
ρ_{s}	[kg/m ³]	Dichte des Schüttsteinmaterials, Rohdichte der Wasserbausteine
ρ_{w}	[kg/m ³]	Dichte des Wassers
σ'_{v}	[kN/m ²]	effektive Vertikalspannung
τ_{A}	[kN/m ²]	Zusatzspannung aus einer Aufhängung der Deckschicht
τ_{F}	[kN/m ²]	Zusatzspannung aus einer Fußstützung
φ'	[°]	effektiver Reibungswinkel des Bodens
φ'_{AB}	[°]	wirksamer Reibungswinkel zwischen Zugelement und Boden oder Zugelement und Deckschicht über dem abgesenkten Wasserspiegel; der kleinere Wert ist maßgebend
φ'_{D}	[°]	innerer Reibungswinkel der Steinschüttung bzw. des Deckschichtmaterials

$\varphi'_{D,hydr}$	[°]	Reibungswinkel des Deckschichtmaterials, Schüttwinkel des Deckschichtmaterials
φ'_{DF}	[°]	wirksamer Reibungswinkel der Steinschüttung in der Fußvorlage
ψ	[-]	Verhältnis Steinlänge zu nominalem Steindurchmesser
∇	[m ³]	verdrängtes Wasservolumen

Anhang A Rechenansätze für die geotechnische Bemessung zur Ermittlung des erforderlichen Flächengewichts von Deckschichten

Anhang A1 Abgleiten der Deckschicht, Grundfall (zu Kap. 7.2.5.2)



Kräfte pro lfdm und pro Breitereinheit

Eigengewicht:
$$G' = (\gamma_D' \cdot d_D + \gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{krit}) \cdot 1 \cdot 1 \quad (1)$$

Porenwasserüberdruck:
$$U = \Delta u(z) = \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - a \cdot e^{-b \cdot z}) \cdot 1 \cdot 1 \quad (2)$$

mit $z = d_{krit}$

Kohäsionskraft:
$$C' = c' \cdot 1 \cdot 1 \quad (3)$$

Zusätzl. äquivalente Schubkraft:
$$T_z = \tau_z \cdot 1 \cdot 1 \quad (4)$$

Die zusätzliche äquivalente Schubkraft repräsentiert weitere am Bruchkörper wirkende Kräfte z. B. aus Fußstützung oder Verankerung.

Kräftegleichgewichte für lokale Standsicherheit

$$\sum V = 0: \quad G' - U \cdot \cos \beta - Q \cdot \cos(\varphi' - \beta) - C' \cdot \sin \beta - T_z \cdot \sin \beta = 0 \quad (5)$$

$$\sum H = 0: \quad U \cdot \sin \beta - Q \cdot \sin(\varphi' - \beta) - C' \cdot \cos \beta - T_z \cdot \cos \beta = 0 \quad (6)$$

Umformungen

$$(5) \cdot \sin(\varphi' - \beta) :$$

$$G' \cdot \sin(\varphi' - \beta) - U \cdot \cos \beta \cdot \sin(\varphi' - \beta) - Q \cdot \cos(\varphi' - \beta) \cdot \sin(\varphi' - \beta) - (C' + T_z) \cdot \sin \beta \cdot \sin(\varphi' - \beta) = 0 \quad (7)$$

$$(6) \cdot \cos(\varphi' - \beta) :$$

$$U \cdot \sin \beta \cdot \cos(\varphi' - \beta) - Q \cdot \sin(\varphi' - \beta) \cdot \cos(\varphi' - \beta) - (C' + T_z) \cdot \cos \beta \cdot \cos(\varphi' - \beta) = 0 \quad (8)$$

$$(7) - (8) :$$

$$G' \cdot \sin(\varphi' - \beta) - U \cdot (\cos \beta \cdot \sin(\varphi' - \beta) + \sin \beta \cdot \cos(\varphi' - \beta)) - (C' + T_z) \cdot (\sin \beta \cdot \sin(\varphi' - \beta) - \cos \beta \cdot \cos(\varphi' - \beta)) = 0$$

$$G' \cdot \sin(\varphi' - \beta) - U \cdot \sin \varphi' + (C' + T_z) \cdot \cos \varphi' = 0 \quad (9)$$

Erforderliches Deckschichtgewicht

Auflösen der Grundgleichung (9) nach der erforderlichen Gewichtskraft G' :

$$G' = \frac{U \cdot \sin \varphi' - (C' + T_z) \cdot \cos \varphi'}{\sin(\varphi' - \beta)} \quad \left| \frac{1/\cos \varphi'}{1/\cos \varphi'} \right.$$

$$G' = \frac{U \cdot \tan \varphi' - C' - T_z}{\cos \beta \cdot \tan \varphi' - \sin \beta} \quad (10)$$

Einsetzen von (1), (2), (3) und (4) in (10) liefert für $z = d_{\text{krit}}$ das erforderliche Deckschichtgewicht g' :

$$g' = \gamma_D' \cdot d_D = \frac{\Delta u(d_{\text{krit}}) \cdot \tan \varphi' - c' - \tau_z}{\cos \beta \cdot \tan \varphi' - \sin \beta} - (\gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{\text{krit}}) \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-9)} \quad (11)$$

mit: $\Delta u(d_{\text{krit}}) = \gamma_w z_a (1 - a e^{-b d_{\text{krit}}})$ Porenwasserüberdruck in der kritischen Tiefe

Hinweis: In Gl (7-9) im GBB 2010 steht im Zähler $-\tau_z = -\tau_F - \tau_A$, weil die zusätzliche Schubspannung (Z) durch eine Fußstützung (F) und eine Aufhängung erbracht werden kann!

Zusätzlich erforderliche äquivalente Schubspannung erf τ_z

Bei gegebenem Deckschichtgewicht ergibt sich aus (9) die zusätzlich erforderliche äquivalente Schubkraft T_z :

$$T_z = G' \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi') + U \cdot \tan \varphi' - C' \quad (12)$$

Einsetzen von (1), (2), (3) und (4) in (12) ergibt in der Tiefe $z = d_{\text{krit}}$ die zusätzlich erforderliche äquivalente Schubspannung $\text{erf } \tau_z$:

$$\text{erf } \tau_z = (\gamma_D' \cdot d_D + \gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{\text{krit}}) \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \varphi') + \Delta u(d_{\text{krit}}) \cdot \tan \varphi' - c' \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-10)} \quad (13-1)$$

Herleitung von d_{krit} aus Gl. (9)

$$f(z) = G' \cdot \sin(\varphi' - \beta) - U \cdot \sin \varphi' + (C' + T_z) \cdot \cos \varphi'$$

Einsetzen von (1) und (2) ergibt

$$f(z) = (\gamma_D' \cdot d_D + \gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot z) \cdot \sin(\varphi' - \beta) - \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - a \cdot e^{-b \cdot z}) \cdot \sin \varphi' + (C' + T_z) \cdot \cos \varphi'$$

Ableitung nach der Tiefe z (mit $a = 1$)

$$\frac{df(z)}{dz} = \underbrace{\gamma' \cdot z \cdot \sin(\varphi' - \beta)}_{\text{Winkeltheorem}} - \gamma_w \cdot z_a \cdot (-(-b) \cdot 1 \cdot e^{-b \cdot z}) \cdot \sin \varphi'$$

Minimum:

$$\frac{df(z)}{dz} = 0$$

$$0 = \gamma' \cdot z \cdot (\sin \varphi' \cos \beta - \cos \varphi' \sin \beta) - \gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot e^{-b \cdot z} \cdot \sin \varphi' \quad \left| : \sin \varphi' \right.$$

$$0 = \gamma' \cdot z \cdot \left(\cos \beta - \frac{1}{\tan \varphi'} \sin \beta \right) - \gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot e^{-b \cdot z}$$

$$0 = \gamma' \cdot z \cdot \left(\frac{\cos \beta \tan \varphi' - \sin \beta}{\tan \varphi'} \right) - \gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot e^{-b \cdot z} \quad \left| \cdot \tan \varphi' \right. \quad \left| \sin \beta = \tan \beta \cos \beta \right.$$

$$\gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot e^{-b \cdot z} \cdot \tan \varphi' = \gamma' \cdot z \cdot \cos \beta (\tan \varphi' - \tan \beta)$$

Kritische Tiefe d_{krit} für Abgleiten der Deckschicht

in der Tiefe $z = d_{\text{krit}}$

und ()-1

und $\ln ()$

$$d_{\text{krit}} = \frac{1}{b} \ln \left\{ \frac{\gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot \tan \varphi'}{\gamma' \cdot \cos \beta (\tan \varphi' - \tan \beta)} \right\} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-7)} \quad (13-2)$$

Anhang A2 Verhinderung von hydrodynamischen Bodenverlagerungen (zu Kap. 7.2.6.2)

Die kritische Tiefe d_{krithB} der Bruchfuge, unterhalb derer keine hydrodynamische Bodenverlagerung mehr stattfindet, ergibt sich dort, wo die Differenz zwischen effektiver Normalspannung und Porenwasserüberdruck $\Delta u(z)$ den kleinsten Wert annimmt oder Null wird. Das erforderliche Flächengewicht des Deckwerks muss so gewählt werden, dass die effektive Normalspannung immer positiv bleibt.

Gleichgewicht senkrecht zur Böschung, betrachtet als Funktion

$$f(z) = \underbrace{\gamma' \cdot z \cdot \cos \beta}_{\text{Boden}} + \underbrace{\gamma_D' \cdot d_D \cdot \cos \beta}_{\text{Deckwerk}} + \underbrace{\gamma_F' \cdot d_F \cdot \cos \beta}_{\text{Filter}} - \underbrace{\Delta u(z)}_{\text{Porenwasserüberdruck}} \quad (14)$$

effektive Normalspannung aus allen Eigengewichten

mit:

$$\Delta u(z) = \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - a \cdot e^{-b \cdot z}) \quad \text{Porenwasserüberdruck} \quad (15)$$

Umformungen

(15) in (14) eingesetzt:

$$f(z) = \gamma' \cdot z \cdot \cos \beta + \gamma_D' \cdot d_{DF} \cdot \cos \beta + \gamma_F' \cdot d_F \cdot \cos \beta - \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - a \cdot e^{-b \cdot z}) \quad (16)$$

Ableitung nach der Tiefe z (mit $a = 1$):

$$\frac{df(z)}{dz} = \gamma' \cdot \cos \beta - \gamma_w \cdot z_a \cdot b \cdot e^{(-b \cdot z)} \quad (17)$$

Minimum:

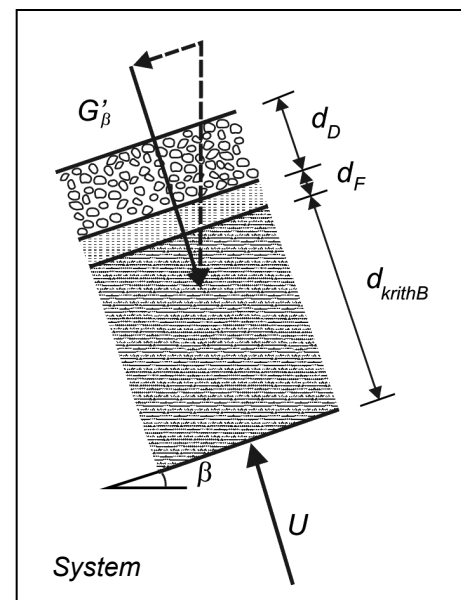
$$\frac{df(z)}{dz} = 0$$

$$e^{(-b \cdot z)} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \cdot \frac{\cos \beta}{z_a \cdot b}$$

Kritische Tiefe d_{krithB} für hydrodynamische Bodenverlagerung

mit $z = d_{\text{krithB}}$:

$$d_{\text{krithB}} = \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{b \cdot \gamma_w \cdot z_a}{\gamma' \cdot \cos \beta} \right) \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-12)} \quad (18)$$



Gleichgewicht senkrecht zur Böschung:

$$G'_{\beta} = G' \cdot \cos \beta \geq U \quad (19)$$

$$\gamma_D' \cdot d_D \cdot \cos \beta + \gamma_F' \cdot d_F \cdot \cos \beta + \gamma' \cdot d_{krithB} \cdot \cos \beta \geq \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - e^{(-b \cdot d_{krithB})}) \quad (20)$$

$$\gamma_D' \cdot d_D \cdot \cos \beta \geq \gamma_w \cdot z_a \cdot (1 - e^{(-b \cdot d_{krithB})}) - (\gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{krithB}) \cdot \cos \beta \quad (21)$$

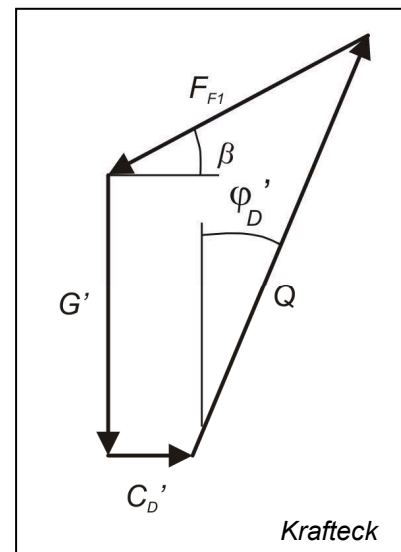
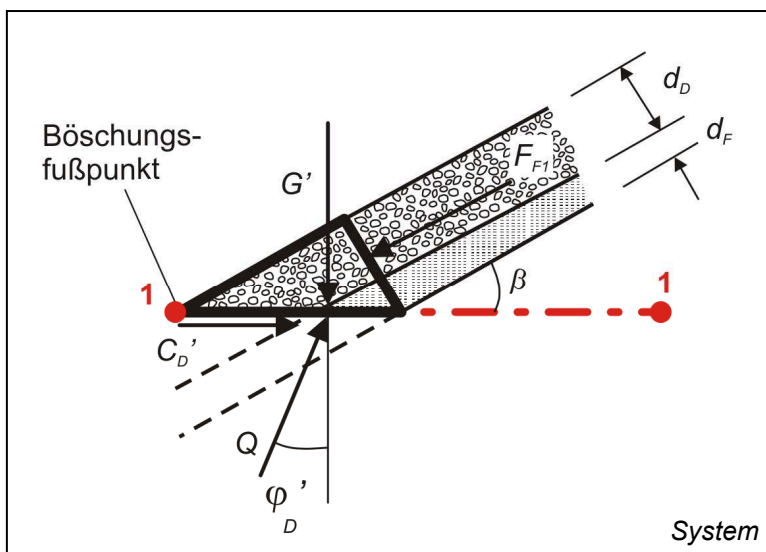
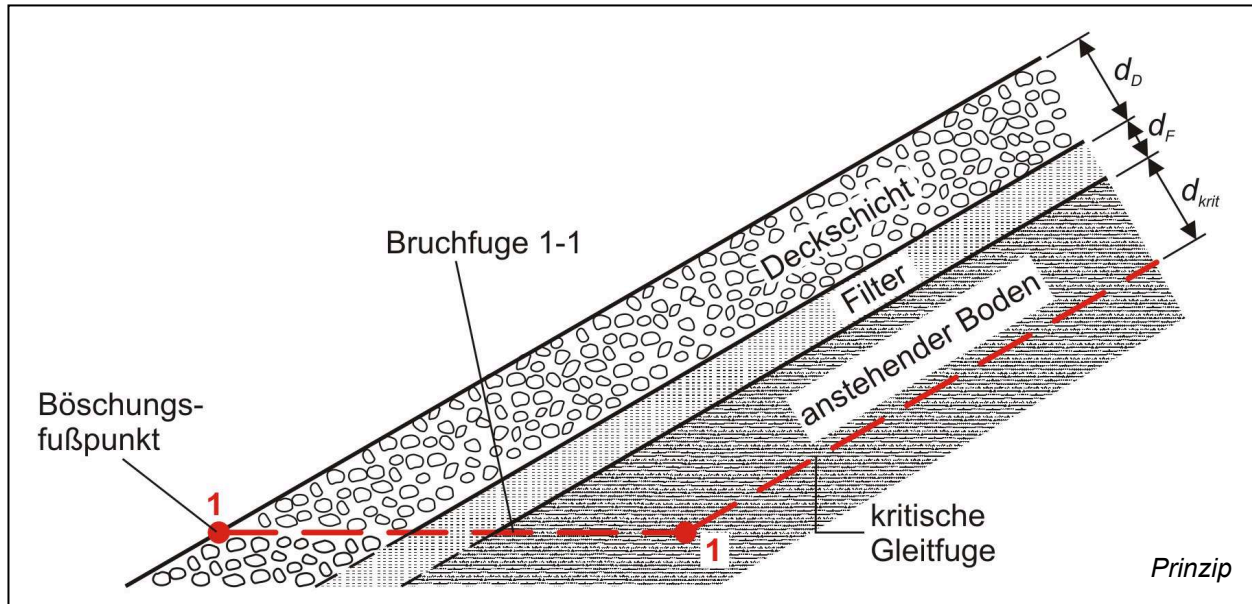
Erforderliche Auflast g' zur Verhinderung von hydrodynamischen Bodenverlagerungen:

$$g' = \gamma_D' \cdot d_D \geq \frac{\Delta u}{\cos \beta} - (\gamma_F' \cdot d_F + \gamma' \cdot d_{krithB}) \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-11)} \quad (22)$$

Anhang A3 Böschungssicherung mit einer Fußstützung

Anhang A3.1 Bruchmechanismus 1 am Böschungsfußpunkt (zu Kap. 7.2.7.2)

Bruchmechanismus 1 gilt für alle 3 Fußstützungen Vorlage, Einbindung und Spundwand.



Kräfte pro lfdm:

Gewichtskraft:

$$G' = \frac{1}{2} \frac{d_F^2}{\tan \beta} \cdot \gamma_F' + \left(\frac{d_D \cdot d_F}{\tan \beta} + \frac{1}{2} \frac{d_D^2}{\tan \beta} \right) \cdot \gamma_D' \quad (23)$$

Kohäsionskraft:

$$C_D' = c_D' \cdot \frac{d_D}{\sin \beta} \quad (24)$$

Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad G' - Q \cdot \cos \varphi_D' + F_{F1} \cdot \sin \beta = 0 \quad (25)$$

$$\sum H = 0: \quad F_{F1} \cdot \cos \beta - C_D' - Q \cdot \sin \varphi_D' = 0 \quad (26)$$

Umformungen

Auflösen (26) nach Q:

$$Q = \frac{F_{F1} \cdot \cos \beta - C_D'}{\sin \varphi_D'} \quad (27)$$

(27) in (25) :

$$G' + F_{F1} \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \frac{\cos \varphi_D'}{\sin \varphi_D'}) + C_D' \cdot \frac{\cos \varphi_D'}{\sin \varphi_D'} = 0 \quad / \cdot \frac{\sin \varphi_D'}{\cos \varphi_D'} = \tan \varphi_D'$$

$$G' \cdot \tan \varphi_D' + F_{F1} \cdot (\sin \beta \cdot \tan \varphi_D' - \cos \beta) + C_D' = 0 \quad (28)$$

Mobilisierbare maximale äquivalente Schubspannung max τ_{F1}

Jede Fußstützung kann bei Bruchmechanismus 1 eine maximale äquivalente Schubspannung max τ_{F1} mobilisieren, die definiert wird als Quotient aus der Kraft F_{F1} (aufgelöst aus (28)) und der Deckwerkslänge unter Wasser L_U :

$$\max \tau_{F1} = \frac{F_{F1}}{L_U} \quad (29)$$

mit:

$$L_U = \frac{(h_w - z_a)}{\sin \beta} \quad (30)$$

Einsetzen von (23), (24) und (30) in (29) und die Annahme, dass in der Deckschicht keine Kohäsion vorliegt ($c'_D = 0$), liefert:

$$\max \tau_{F1} = \frac{(\frac{1}{2} d_F^2 \cdot \gamma_F' + (d_D \cdot d_F + \frac{1}{2} d_D^2) \cdot \gamma_D') \cdot \frac{\tan \varphi_D'}{\tan \beta}}{(\cos \beta - \sin \beta \cdot \tan \varphi_D') \cdot (h_w - z_a) \cdot \frac{1}{\sin \beta}}$$

bzw.

$$\max \tau_{F1} = \frac{(\frac{1}{2} d_F^2 \cdot \gamma_F' + (d_D \cdot d_F + \frac{1}{2} d_D^2) \cdot \gamma_D') \cdot \tan \varphi_D' \cdot \cos \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \cdot \tan \varphi_D') \cdot (h_w - z_a)} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-14)} \quad (31)$$

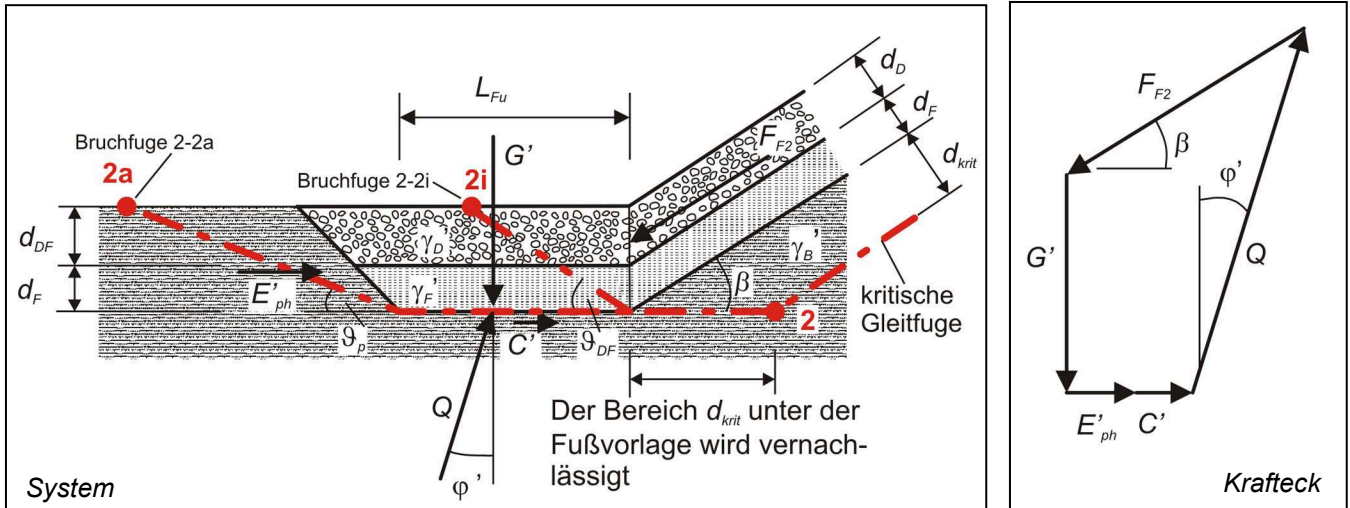
Hinweis: Durch Einsetzen von (31) in (11) lässt sich Gleichung (7-13) herleiten.

Anhang A3.2 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußstützung

Der Nachweis im Bruchmechanismus 2 unterscheidet sich je nach Stützungsart.

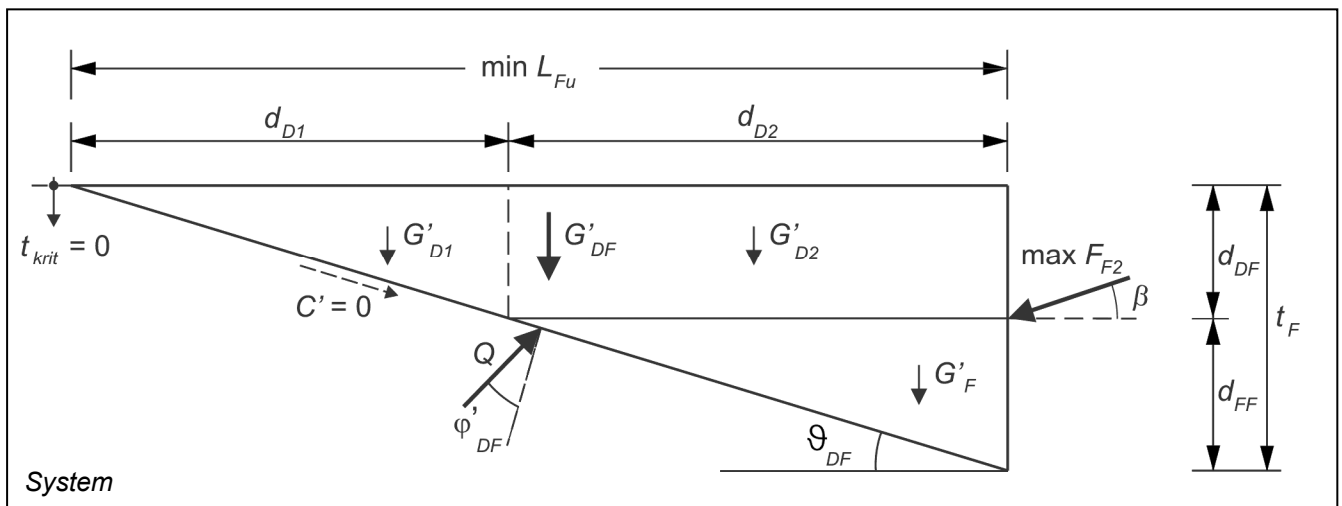
Anhang A3.2.1 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußvorlage (zu Kap. 7.2.7.3)

Im Fall der Fußvorlage müssen für den Bruchmechanismus 2 je ein Nachweis innerhalb (Bruchfuge 2i) und außerhalb (Bruchfuge 2a) der Vorlage geführt werden.



A) Nachweis innerhalb

Systemskizze zur Ermittlung der Fußstützkraft $\max F_{F2,i}$ innerhalb der Fußvorlage:



Kräftegleichgewichte

$$\Sigma V = 0: \quad Q \cdot \cos(\varphi_{DF}' + \vartheta_{DF}) - G_{DF}' - \max F_{F2} \cdot \sin \beta = 0 \quad (32)$$

$$\Sigma H = 0: -Q \cdot \sin(\varphi_{DF}' + \vartheta_{DF}) + \max F_{F2} \cdot \cos \beta = 0 \quad (33)$$

Umformungen

Auflösen (33) nach Q:

$$Q = \frac{\max F_{F2} \cdot \cos \beta}{\sin(\varphi_{DF}' + \vartheta_{DF})}$$

eingesetzt in (32) und mit

$$\vartheta_{DF} = 45^\circ - \frac{\varphi_{DF}'}{2} \quad \text{Gleitflächenwinkel} \quad (34)$$

folgt für max F_{F2} :

$$\max F_{F2} = \frac{G'}{\cos \beta \cot(\varphi_{DF}' + \vartheta_{DF}) - \sin \beta} \quad (35)$$

mit

$$G' = \underbrace{\frac{d_{DF}^2 \gamma_{DF}'}{2 \tan \vartheta_{DF}}}_{\text{entspr. } G'_{D1}} + \underbrace{\frac{d_{FF}^2 \gamma_{FF}'}{2 \tan \vartheta_{DF}}}_{\text{entspr. } G'_F} + \underbrace{\frac{d_{DF} d_{FF} \gamma_{DF}'}{\tan \vartheta_{DF}}}_{\text{entspr. } G'_{D2}} \quad \text{Gewichtskraft unter Auftrieb} \quad (36)$$

Mobilisierbare maximale äquivalente Schubspannung max $\tau_{F2,i}$

Im Bruchmechanismus 2 (Nachweis innerhalb) wird eine maximale äquivalente Schubspannung max $\tau_{F2,i}$ mobilisiert, die analog (29) definiert ist:

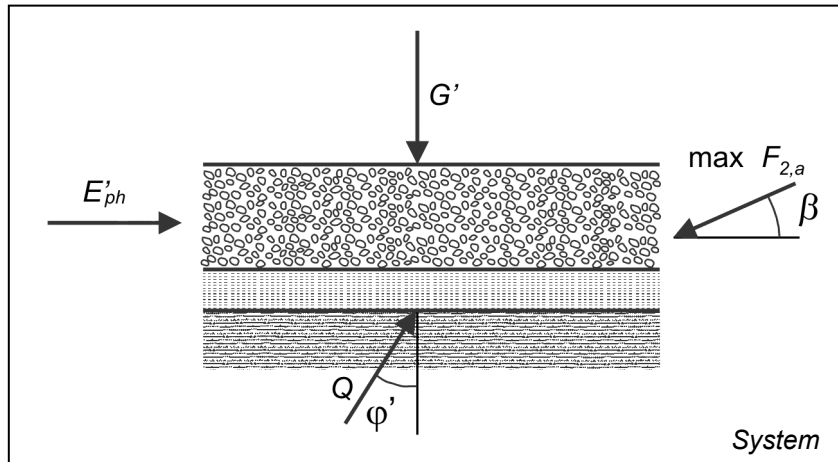
$$\max \tau_{F2,i} = \frac{\max F_{F2}}{L_u} \quad (37)$$

Mit (35) und (36) sowie (30) wird daraus:

$$\max \tau_{F2,i} = \frac{\left(d_{DF}^2 \gamma_{DF}' + d_{FF}^2 \gamma_{FF}' + 2 d_{DF} d_{FF} \gamma_{DF}' \right) \sin \beta}{\left[\cos \beta \cot(\varphi_{DF}' + \vartheta_{DF}) - \sin \beta \right] 2 \tan \vartheta_{DF} (h_w - z_a)} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-16)} \quad (38)$$

B) Nachweis außerhalb

Systemskizze zur Ermittlung der Fußstützkraft $\max F_{F2,a}$ außerhalb der Fußvorlage:



Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad Q' \cos \varphi' - G' - \max F_{2a} \sin \beta = 0 \quad (39)$$

$$\sum H = 0: \quad \max F_{2a} \cos \beta - Q' \sin \varphi' - E'_{ph} = 0 \quad (40)$$

Umformungen

Auflösen (39) nach Q und einsetzen in (40):

$$\max F_{2a} = \frac{G' \tan \varphi' + E'_{ph}}{\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi'} \quad (41)$$

Mobilisierbare maximale äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2,a}$

Im Bruchmechanismus 2 (Nachweis außerhalb) wird eine maximale äquivalente Schubspannung $\max \tau_{F2,a}$ mobilisiert, die analog (29) definiert ist:

$$\max \tau_{F2,a} = \frac{\max F_{2a}}{L_u}$$

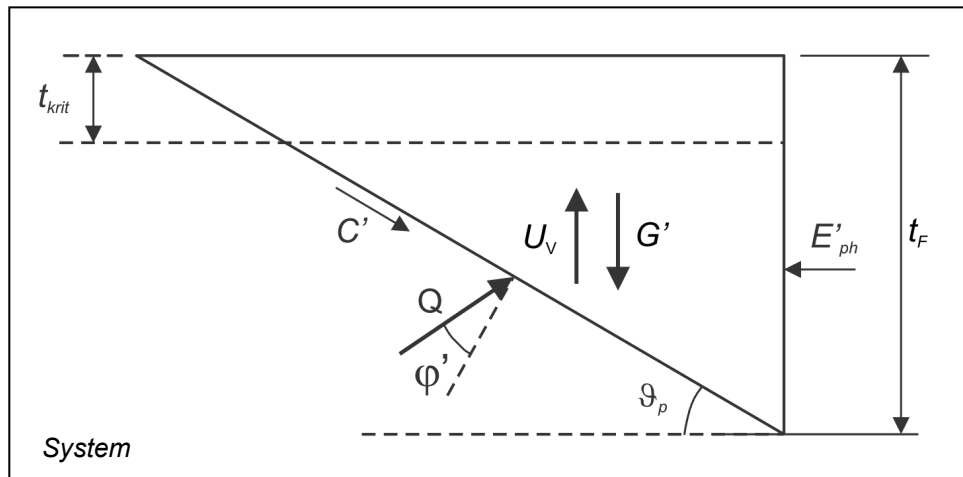
ergibt sich:

$$\max \tau_{F2,a} = \frac{[(\sigma_v' \tan \varphi' + c') L_{Fu} + E'_{ph}] \sin \beta}{(\cos \beta - \sin \beta \tan \varphi')(h_w - z_a)} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-17)} \quad (42)$$

Passiver Erddruck E'_{ph}

Bei der maximal aufnehmbaren äquivalenten Schubspannung $\max \tau_{F2,a}$ nach (42) darf der vor der Fußvorlage wirkende passive Erddruck E'_{ph} berücksichtigt werden.

Systemskizze zur Ermittlung des passiven Erddrucks E'_{ph} :



Kräftegleichgewichte

$$(1) \sum V = 0: \quad -C' \sin \vartheta_p + Q' \cos(\varphi' + \vartheta_p) + U_v - G' = 0 \quad (43)$$

$$(2) \sum H = 0: \quad -C' \cos \vartheta_p - Q' \sin(\varphi' + \vartheta_p) + E'_{ph} = 0 \quad (44)$$

Passiver Erddruck E'_{ph} vor der Fußvorlage

Auflösen (43) nach Q' und einsetzen in (44) sowie auflösen nach E'_{ph} liefert

$$E'_{ph} = (G' - U_v + C' \sin \vartheta_p) \tan(\varphi' + \vartheta_p) + C' \cos \vartheta_p \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-21)} \quad (45)$$

mit folgenden Hilfsfunktionen:

$$\vartheta_p = 45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$$

$$G' = \frac{(t_F - t_{krit})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p}$$

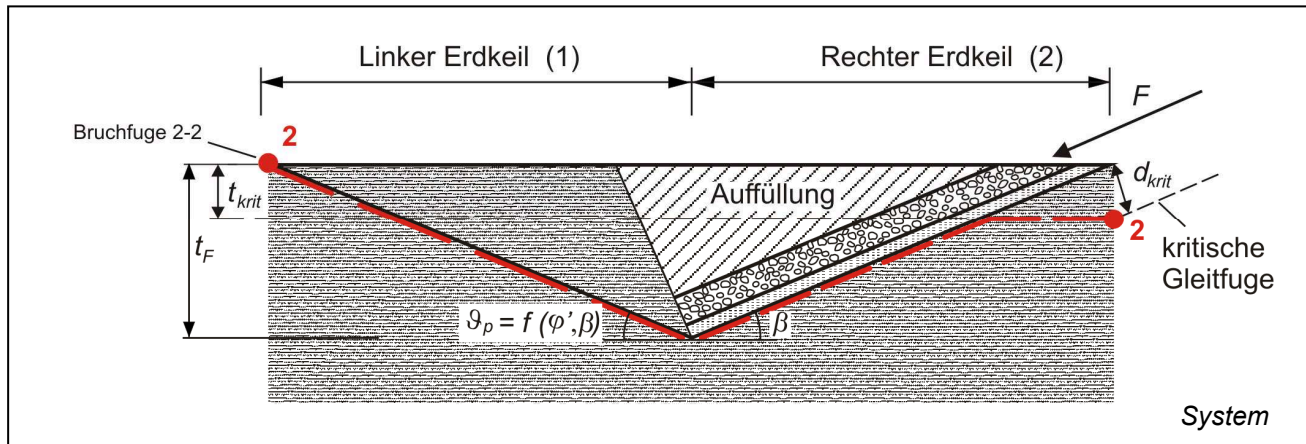
$$C' = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}$$

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-b t_F} - e^{-b t_{krit}}}{b} + e^{-b t_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right]$$

Anhang A3.2.2 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußeinbindung (zu Kap. zu 7.2.7.4)

Im Fall der Fußeinbindung müssen für den Bruchmechanismus 2 zur Bestimmung der erreichbaren äquivalenten Schubspannung der Fußstützung ein linker Erdkeil vor der Einbindung (Gleitflächenwinkel ϑ_p) und ein rechter Erdkeil mit dem eingebundenen Deckwerk (Böschungswinkel β) betrachtet werden.

Skizze des Gesamtsystems der Fußeinbindung



Geometrische Größen

$$L_u = \frac{h_w - z_a + t_k + t_{krit}}{\sin \beta} \quad \text{Unterwasserlänge des Deckwerks unter Berücksichtigung von Kolktafe (Vorgabe) und kritischer Tiefe (nach (48))} \quad (46)$$

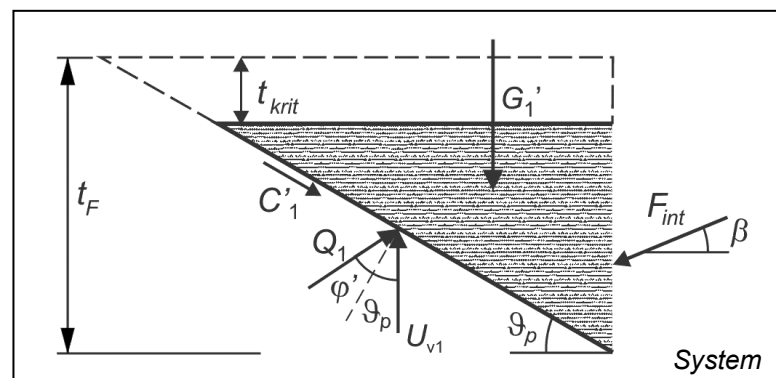
$$\vartheta_p = \arctan \left[\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi') \tan \varphi'}{\tan \varphi' + \tan \beta}} - \tan \varphi' \right] \quad \text{Gleitflächenwinkel} \quad (47)$$

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b \gamma_w z_a}{\gamma'} \right) \quad \text{kritische Tiefe = Fluidisierungstiefe aus (18) mit } \beta = 0 \quad (48)$$

Linker Erdkeil (1)

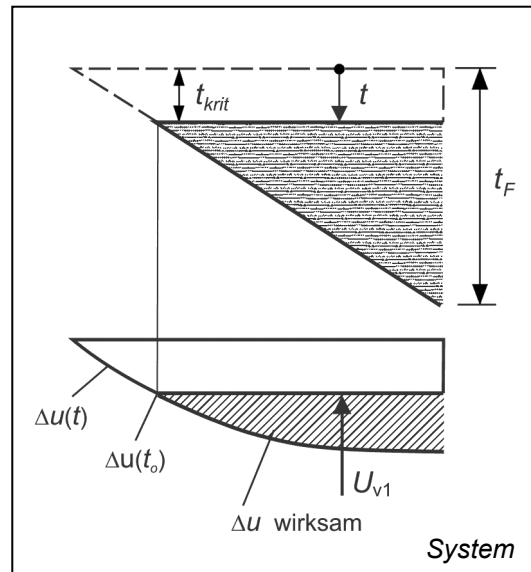
- Im linken Erdkeil wird im Bereich der kritischen Tiefe t_{krit} kein Bodengewicht angesetzt.
- Im verbleibenden Bodenbereich wird ein vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v1} berücksichtigt.
- Zur Übertragung der Kraft zwischen Erdkeil links und rechts wird eine interne Kraft F_{int} eingeführt.

Systemskizze des linken Erdkeils zur Ermittlung der internen Kraft F_{int}



Vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v1}

Systemskizze des linken Erdkeils zur Ermittlung Porenwasserüberdruck U_{v1}



Verteilung des Porenwasserüberdrucks im verbleibenden, nicht fluidisierten Boden:

$$\begin{aligned}
 U_{v1} &= \int \Delta u(x) dx - \Delta u(t_{krit}) \frac{t_F - t_{krit}}{\tan \vartheta_p} \\
 \text{mit } dx &= \frac{dt}{\tan \vartheta_p} \quad \text{und} \quad \Delta u(t) = \gamma_w z_a (1 - e^{-bt}) \\
 U_{v1} &= \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \cdot \int_{t_{krit}}^{t_F} (1 - e^{-bt}) dt - \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} (1 - e^{-bt_{krit}}) (t_F - t_{krit}) \\
 &= \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[t_F + \frac{1}{b} e^{-bt_F} - t_0 - \frac{1}{b} e^{-bt_{krit}} - t_F + t_F e^{-bt_{krit}} + t_0 - t_0 e^{-bt_{krit}} \right] \\
 U_{v1} &= \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \tag{49}
 \end{aligned}$$

Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad -C'_1 \sin \vartheta_p + Q_1 \cos(\varphi' + \vartheta_p) + U_{v1} - G'_1 - F_{int} \sin \beta = 0 \tag{50}$$

$$\sum H = 0: \quad -C'_1 \cos \vartheta_p - Q_1 \sin(\varphi' + \vartheta_p) + F_{int} \cos \beta = 0 \tag{51}$$

Umformungen

Auflösen (51) nach Q_1 :

$$Q_1 = \frac{F_{int} \cos \beta - C'_1 \cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} \tag{52}$$

(52) in (50):

$$-C'_1 \sin \vartheta_p + \frac{F_{\text{int}} \cos \beta - C'_1 \cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} + U_{v1} - G'_1 - F_{\text{int}} \sin \beta = 0$$

Interne Kraft F_{int}

Auflösen nach F_{int} :

$$F_{\text{int}} \left(\frac{\cos \beta}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} - \sin \beta \right) = C'_1 \sin \vartheta_p + G'_1 - U_{v1} + C'_1 \frac{\cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)}$$

$$F_{\text{int}} = \frac{-U_{v1} + G'_1 + C'_1 \left(\sin \vartheta_p + \frac{\cos \vartheta_p}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)} \right)}{-\sin \beta + \frac{\cos \beta}{\tan(\varphi' + \vartheta_p)}} \quad (53)$$

mit

$$G'_1 = \frac{1}{2} (t_F - t_{\text{krit}})^2 \gamma'$$

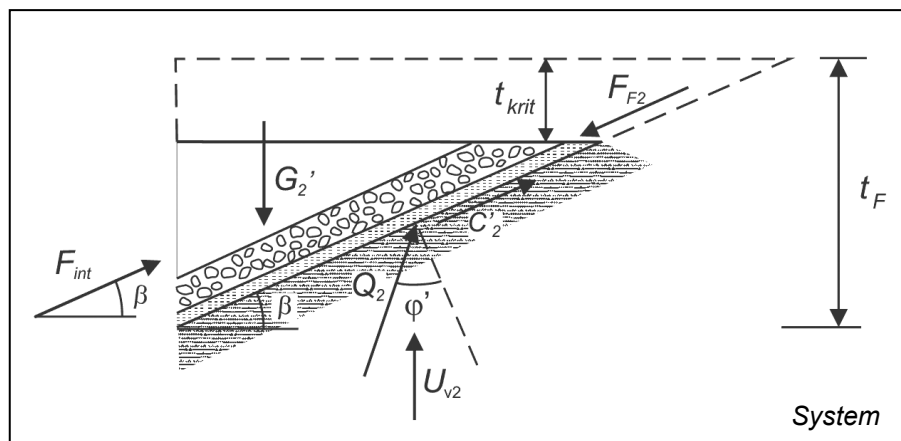
$$\tan \vartheta_p$$

$$C'_1 = \frac{c'(t_F - t_{\text{krit}})}{\sin \vartheta_p}$$

Rechter Erdkeil (2)

- Im rechten Erdkeil wird im Bereich der kritischen Tiefe t_{krit} kein Bodengewicht angesetzt.
- Im verbleibenden Bodenbereich wird ein vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v2} berücksichtigt.
- Zur Übertragung der Kraft zwischen Erdkeil links und rechts wird die interne Kraft F_{int} nach (53) verwendet.

Systemskizze des linken Erdkeils zur Ermittlung der internen Kraft F_{int}



Vertikaler Porenwasserüberdruck U_{v2}

Analog (49) gilt mit $\vartheta_P \rightarrow \beta$:

$$U_{v2} = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \beta} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \quad (54)$$

Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad G'_2 - U_{v2} - Q_2 \cos(\varphi' - \beta) - C'_2 \sin \beta - F_{int} \sin \beta + F_{F2} \sin \beta = 0 \quad (55)$$

$$\sum H = 0: \quad F_{int} \cos \beta + Q_2 \sin(\varphi' - \beta) + C'_2 \cos \beta - F_{F2} \cos \beta = 0 \quad (56)$$

Umformungen

Auflösen (56) nach Q_2 :

$$Q_2 = \frac{(F_{F2} - F_{int} - C'_2) \cos \beta}{\sin(\varphi' - \beta)} \quad (57)$$

(57) in (55) und ordnen:

$$G'_2 - U_{v2} - (F_{F2} - F_{int} - C'_2) \cos \beta \cot(\varphi' - \beta) - C'_2 \sin \beta - F_{int} \sin \beta + F_{F2} \sin \beta = 0$$

$$\begin{aligned} F_{F2} (-\cos \beta \cot(\varphi' - \beta) + \sin \beta) &= U_{v2} + C'_2 \sin \beta + F_{int} (\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)) \\ &\quad - G'_2 - C'_2 \cos \beta \cot(\varphi' - \beta) \\ &= U_{v2} - G'_2 + (C'_2 + F_{int}) (\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)) \end{aligned}$$

Erreichbare Schubkraft F_{F2}

Auflösen nach F_{F2} :

$$F_{F2} = \frac{U_{v2} + G'_2}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)} + C'_2 + F_{int} \quad (58)$$

mit

$$G'_2 = \frac{1}{2} (t_F - t_{krit})^2 \gamma'$$

$$\tan \beta$$

$$C'_2 = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \beta}$$

(58) mit (53):

$$F_{F2} = \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 (\sin \vartheta_P + \cos \vartheta_P \cot(\varphi' + \vartheta_P))}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_P)} + \frac{U_{v2} - G'_2}{\sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)} + C'_2$$

$$\boxed{F_{F2} = \frac{U_{v1} - G'_1 - C'_1 A}{B} + \frac{U_{v2} - G'_2}{D} + C'_2} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-24)} \quad (59)$$

mit

$$A = \sin \vartheta_p + \cos \vartheta_p \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

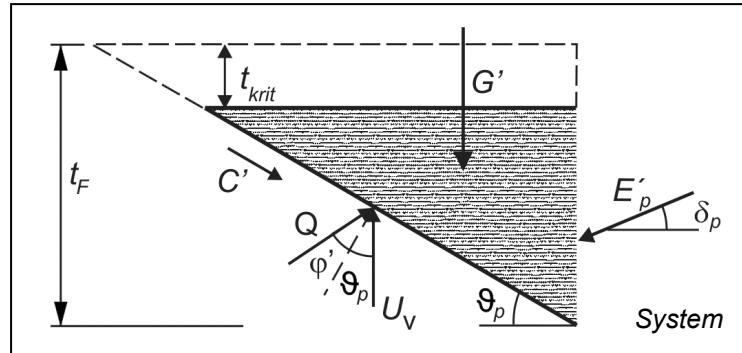
$$B = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' + \vartheta_p)$$

$$D = \sin \beta - \cos \beta \cot(\varphi' - \beta)$$

Anhang A3.2.3 Bruchmechanismus 2 bei einer Fußspundwand (zu Kap. 7.2.7.5)

Im Fall der Fußspundwand ist für den Bruchmechanismus 2 die Bestimmung der Erddruckordinate e'_{ph} wichtig.

Systemskizze zur Ermittlung von e_{ph}



Geometrische Größen

$$\vartheta_p = \arctan \left[\sqrt{\frac{(1 + \tan^2 \varphi' \tan \varphi')}{\tan \varphi' + \tan \delta_p}} - \tan \varphi' \right] \quad \text{Gleitflächenwinkel} \quad (60)$$

$$t_{krit} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\gamma'} \right) \quad \text{kritische Tiefe = Fluidisierungstiefe aus (18) mit } \beta = 0 \quad (61)$$

Porenwasserüberdruck U_v

Analog (49):

$$U_v = \frac{\gamma_w z_a}{\tan \vartheta_p} \left[\frac{e^{-bt_F} - e^{-bt_{krit}}}{b} + e^{-bt_{krit}} (t_F - t_{krit}) \right] \quad (62)$$

Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad G' - U_v - Q \cos(\vartheta_p + \varphi') + C' \sin \vartheta_p + E'_p \sin \delta_p = 0 \quad (63)$$

$$\sum H = 0: \quad C' \cos \vartheta_p + Q \sin(\vartheta_p + \varphi') - E'_p \cos \delta_p = 0 \quad (64)$$

Umformungen

Auflösen (64) nach Q:

$$Q = \frac{E'_p \cos \delta_p - C' \cos \vartheta_p}{\sin(\vartheta_p + \varphi')} \quad (65)$$

(65) in (63) und ordnen:

$$G' - U_v - (E'_p \cos \delta_p - C' \cos \vartheta_p) \cot(\vartheta_p + \varphi') + C' \sin \vartheta_p + E'_p \sin \delta_p = 0$$

$$E'_p (\sin \delta_p - \cos \delta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')) = U_v - G' - C' \sin \vartheta_p - C' \cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')$$

Horizontale Erddruckordinate e'_{ph}

 Auflösen nach Erdwiderstand E'_p

$$E'_p = \frac{U_v - G' - C'(\cos \vartheta_p \cot(\vartheta_p + \varphi') + \sin \vartheta_p)}{\sin \delta_p - \cos \delta_p \cot(\vartheta_p + \varphi')} \quad (66)$$

mit

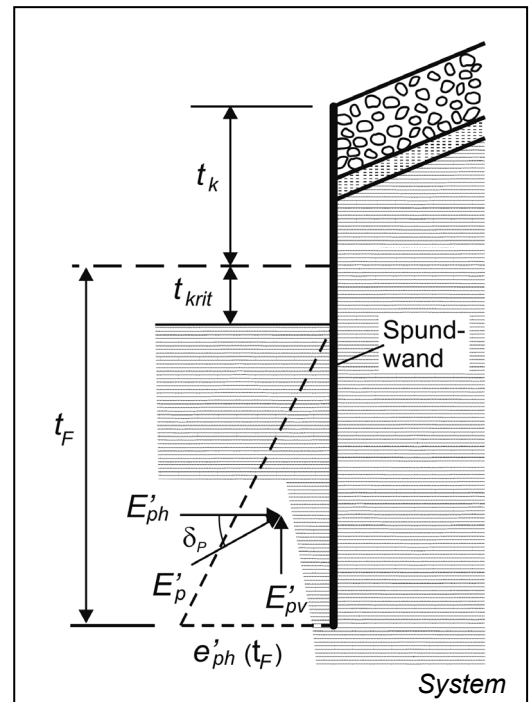
$$C' = \frac{c'(t_F - t_{krit})}{\sin \vartheta_p}$$

$$G' = \frac{(t_F - t_{krit})^2 \gamma'}{2 \tan \vartheta_p}$$

horizontale Komponente
des passiven Erdwiderstandes
(s. Systemskizze rechts)

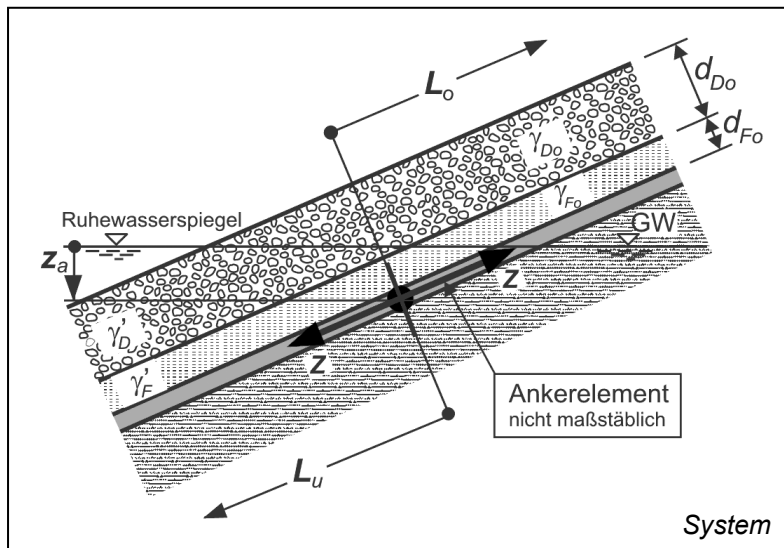
$$E'_{ph} = E'_p \cos \delta_p = \frac{1}{2} (t_F - t_{krit}) e'_{ph}(t_F)$$

$$e'_{ph}(t_F) = \frac{2 E'_p \cos \delta_p}{t_F - t_{krit}} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-28)} \quad (67)$$



Anhang A3.2.4 erforderliches Flächengewicht der Deckschicht oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels bei einer Deckwerksaufhängung (zu Kap. 7.2.8.2)

Für eine Deckwerksaufhängung ergibt sich die aufzunehmende Zugkraft Z aus der erforderlichen Schubspannung τ nach Gl. (7-10) in Abhängigkeit von der gewählten Deckwerksdicke d_D , multipliziert mit der Länge L_u der unter dem abgesenkten Wasserspiegel liegenden Deckschicht.



Kräfte pro lfdm

$$Z = \text{erf } \tau_A \cdot L_u \quad (68)$$

$$C'_{AB} = c'_{AB} \cdot L_o \quad (69)$$

mit L_o Länge der Deckwerksaufhängung oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels (ist vorzugeben)

$$G_{Do} = (\gamma_{Do} \cdot d_{Do} + \gamma_{Fo} \cdot d_{Fo}) \cdot L_o \quad (70)$$

Kräftegleichgewichte

$$\sum V = 0: \quad G_{Do} + Z \sin \beta - C'_{AB} \sin \beta - Q \cos(\varphi'_{AB} - \beta) = 0 \quad (71)$$

$$\sum H = 0: \quad -Z \cos \beta + C'_{AB} \cos \beta + Q \sin(\varphi'_{AB} - \beta) = 0 \quad (72)$$

Umformungen

Auflösen (72) nach Q :

$$Q = \frac{Z \cos \beta - C'_{AB} \cos \beta}{\sin(\varphi'_{AB} - \beta)} \quad (73)$$

(73) in (71) und Auflösen nach G_{Do} :

$$G_{Do} + Z \sin \beta - C'_{AB} \sin \beta - \frac{(Z \cos \beta - C'_{AB} \cos \beta) \cos(\varphi'_{AB} - \beta)}{\sin(\varphi'_{AB} - \beta)} = 0$$

$$G_{Do} = \frac{Z(\cos \beta \cdot \cos(\varphi'_{AB} - \beta) - \sin \beta \sin(\varphi'_{AB} - \beta)) - C'_{AB} (\cos \beta \cdot \cos(\varphi'_{AB} - \beta) - \sin \beta \cdot \sin(\varphi'_{AB} - \beta))}{\sin(\varphi'_{AB} - \beta)}$$

mit der Winkelfunktion

$$\cos \beta \cdot \cos(\varphi'_{AB} - \beta) - \sin \beta \sin(\varphi'_{AB} - \beta) = \cos \varphi'_{AB}$$

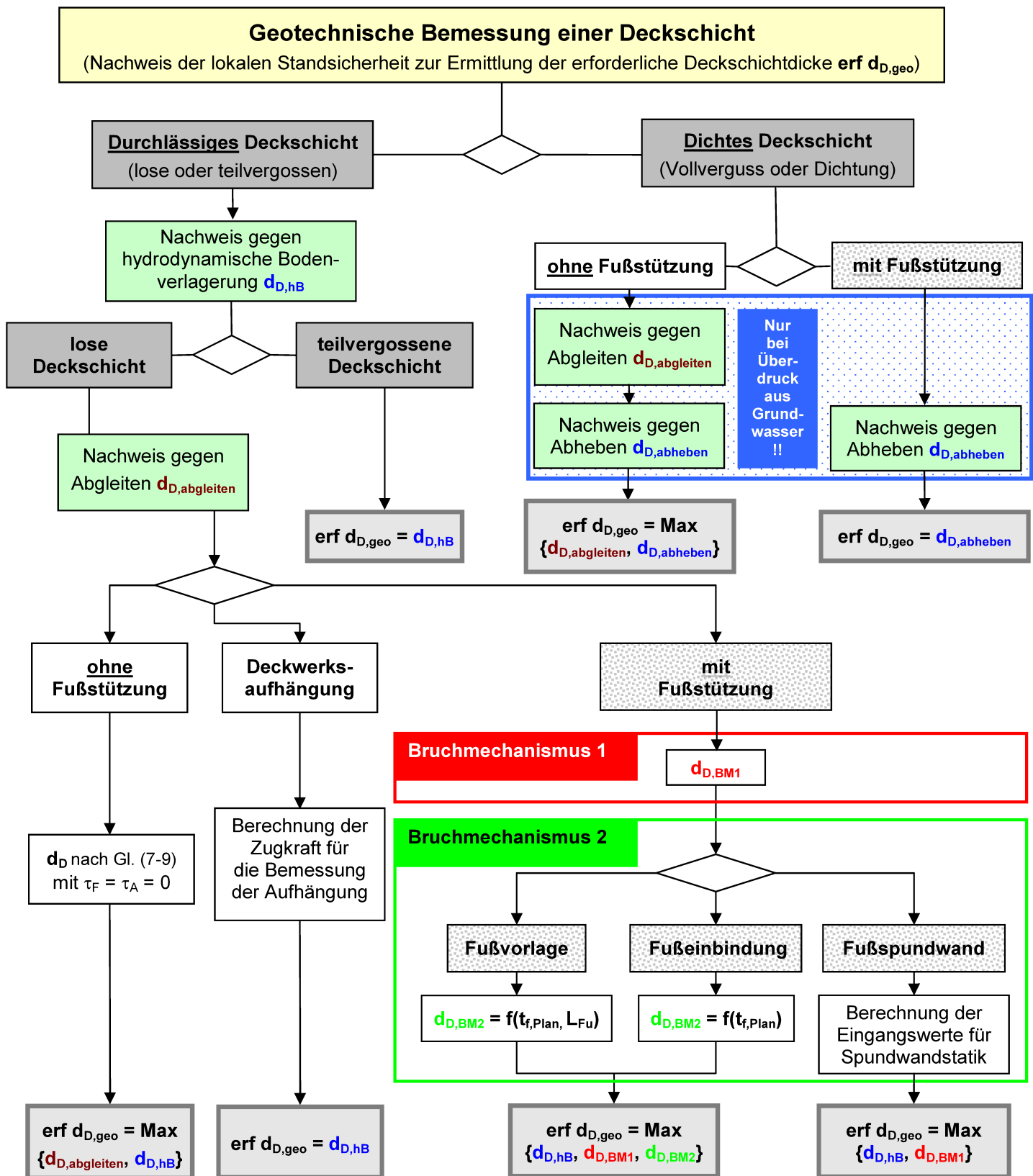
$$G_{Do} = \frac{Z \cos \varphi'_{AB} - C'_{AB} \cos \varphi'_{AB}}{\sin(\varphi'_{AB} - \beta)} \quad (74)$$

Erforderliches Flächengewicht g'

(69) und (70) in (74)

$$g' = \gamma_{Do} \cdot d_{Do} = \frac{Z \cos \varphi'_{AB} - c'_{AB} \cdot L_o \cos \varphi'_{AB}}{L_o \sin(\varphi'_{AB} - \beta)} - \gamma_{Fo} \cdot d_{Fo} \quad \text{im GBB 2010 Gl. (7-29)} \quad (75)$$

Anhang B: Flussdiagramm für die Durchführung der Geotechnischen Bemessung



Hinweis: Bei der Festlegung der erforderlichen Deckschichtdicke **erf** d_D sind anschließend zusätzlich zu **erf** $d_{D,geo}$ die Minstdicken **min** d_D zu berücksichtigen.

Anhang C: Ermittlung eines Ersatztrapezprofils
--

zu 5.2.1 Gewässergeometrie

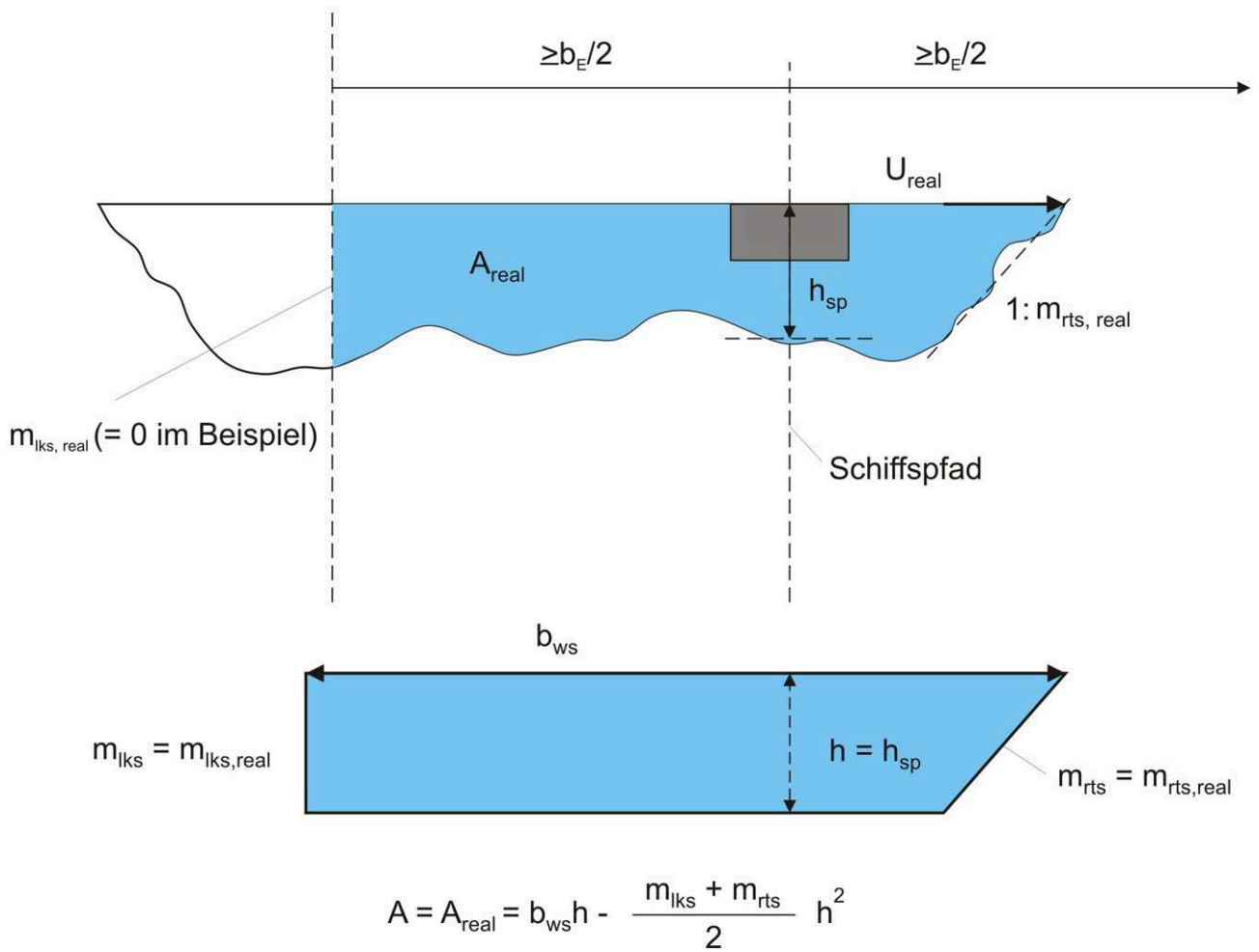
Die hydraulischen Berechnungsverfahren in Kap. 5 gehen von einem trapezförmigen Gewässerquerschnitt mit konstanter Wassertiefe aus. Näherungsweise gelten die Ansätze auch für ein unregelmäßiges Profil, wenn es durch ein trapezförmiges Ersatzprofil angenähert werden kann. Liegt das zu bemessende Ufer links im unregelmäßigen Profil, so ist dies zunächst um die Profilachse zu spiegeln, da zur Bemessung immer das rechte Ufer herangezogen wird. Anschließend ist das Ersatztrapezprofil nach folgenden Grundsätzen, die ihrer Bedeutung nach aufgelistet sind, zu konstruieren. Dabei bleibt die generelle Beschränkung auf weitgehend prismatische Querschnitte, die sich in Fahrtrichtung somit nur wenig verändern dürfen, bestehen, damit die generelle Annahme des in Kap. 5 vorausgesetzten quasistationären Fahrzustandes weiterhin gültig ist.

1. Die mittlere Wassertiefe h_{SP} im Bereich des Schiffspfades bestimmt maßgeblich die mögliche Schiffsgeschwindigkeit und damit den Wasserspiegelabsunk. Deshalb sollte h_{SP} als Wassertiefe h des Ersatztrapezprofils gewählt werden.
2. Für die Stabilität des Deckwerks ist die insbesondere im Wasserwechselbereich gemittelte Böschungsneigung des rechten Bemessungsufers $m_{rts,real}$ im realen Profil maßgebend. Diese sollte der rechten Böschungsneigung im Ersatztrapezprofil entsprechen.
3. Der größte Abstand des Schiffes zum Bemessungsufer u_{real} im realen Profil sollte dem Abstand u im Ersatztrapezprofil entsprechen, damit die Formeln für das Abklingen des Absunks zwischen Schiff und Ufer und des Aufsteilens der Wellen in Ufernähe korrekt abgebildet werden.

Auch der Abstand des Schiffes vom gegenüberliegenden Ufer des Realprofils sollte sich im Ersatztrapezprofil widerspiegeln, damit die Abklingfunktion, die nach **Anhang C** auch bei großen Uferabständen von der Lage des Schiffes im Querprofil abhängt, richtig wiedergegeben wird. Nur dann, wenn der Abstand zum linken Ufer um ein Vielfaches größer als die halbe Einflussbreite des Rückströmungsfeldes ist, kann das Profil dort abgeschnitten werden, siehe folgende Skizze.

4. Neben der Wassertiefe bestimmen die vom Rückströmungsfeld beanspruchte Querschnittsfläche und damit das zugehörige n -Verhältnis die erreichbare Schiffsgeschwindigkeit und den Wasserspiegelabsunk. Deshalb sollte dieser Teil der Querschnittsfläche im realen Profil A_{real} der Fläche A des Ersatztrapezprofils entsprechen (Querschnittsgleichheit).

Ein schematisches Beispiel zur Umsetzung dieser Grundsätze ist nachfolgend dargestellt. Dabei wurde der rückströmungsunwirksame Bereich gemäß Abstandsfall C in Kap. 5.5.1.1 zum linken Ufer hin abgetrennt. Wenn die reale Profilform dadurch zu stark deformiert wird, ist der rückströmungswirksame Bereich zu vergrößern. Im Beispiel ist es möglich, alle vier o. g. Grundsätze zu realisieren, wobei nach Wahl von h , m_{rts} und m_{lks} die noch unbekannte Wasserspiegelbreite b_{WS} im Ersatztrapezprofil aus der Forderung gleicher Querschnittsflächen im maßgebenden Querprofilbereich des Realprofils rückgerechnet werden kann. Im Beispiel wird dadurch die Breite des Ersatztrapezprofils etwas größer als sie sich aus dem Realprofil ableiten lässt. Dies deshalb, weil die Wassertiefen im linken Querprofilbereich im Mittel größer sind als h_{SP} .



Anhang D: Veränderung der mittleren Rückströmungsgeschwindigkeit zwischen Schiff und Ufer bei schlanken Fahrzeugen und geringem Absunk

zu 5.5 Größe von Schiffswellen (Bemessungssituation „Normalfahrt“)

Im Folgenden werden Näherungsformeln zur Veränderung der Rückströmungsgeschwindigkeit und des Wasserspiegelabsunks zwischen Schiff und Ufer hergeleitet. Dabei wird von „schlanken“ Fahrzeugen in Bezug auf ihre Länge und die Kanalbreite ausgegangen. Dadurch kann z. B. der Anteil des Rückströmungsfeldes unter dem Schiff vernachlässigt werden. Weiterhin kann bei gleichzeitiger Annahme, dass der Absunk klein gegen die Wassertiefe h ist, das Umströmungsfeld des Schiffes als ebenes Problem aufgefasst werden, entsprechend einer konstanten Fließgeschwindigkeit über die gleichfalls als konstant angenommene Wassertiefe. Bei kleinem Wasserspiegelabsunk ist auch die Verteilung desselben über die Gewässerbreite identisch zu der aus dem Rückströmungsfeld. Schließlich wird dem Binnenschiff in weiterer Vereinfachung eine elliptische Form gegeben, die, zusammen mit der Annahme einer reibungsfreien Strömung, eine weitgehend analytische Beschreibung des Umströmungsfeldes erlaubt.

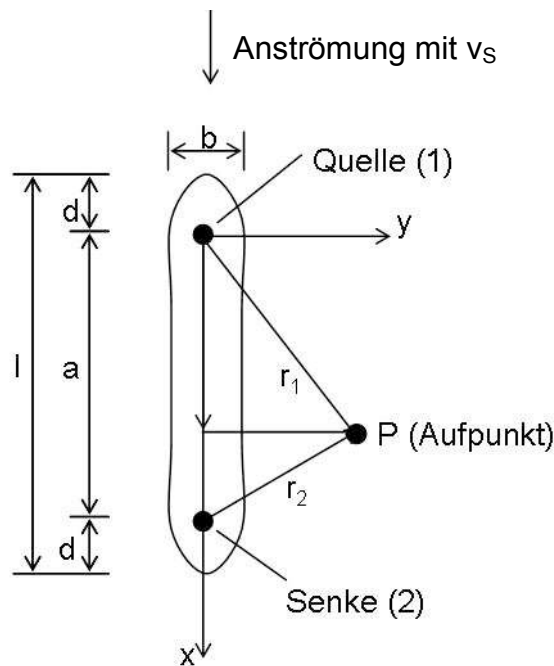
Durch diese Vereinfachungen wird es möglich, die relative (d.h. in Bezug zum Wert am Schiff) Veränderung der Rückströmungsgeschwindigkeit und damit des Absunks zum Ufer hin (Abklingfunktion) von wenigen Einflussparametern, wie der rechnerischen Gewässerbreite b_r , dem zugehörigen Abstand des Schiffes vom Bemessungsufer $u_{r,ts}$, der effektiven Schiffslänge L_{eff} und der Schiffsbreite B abhängig zu machen. Das gleiche gilt für die Einflussbreite des Rückströmungsfeldes b_E und die zugehörige rechnerische Breite des äquivalenten R-Profiles $b_{r,\text{äqui}}$, die den Verlauf der Abklingfunktion widerspiegelt. Natürlich haben auch die Schiffsform, insbesondere bei gedungenen Schiffskörpern und bei kleinen Verhältnissen von Tiefgang T zur Wassertiefe h (in beiden Fällen ergibt sich eine kleinere Einflussbreite als nach vorliegender Theorie) einen Einfluss auf die Abklingfunktion, der jedoch gegenüber dem Einfluss der o. g. Kenngrößen von geringerer Bedeutung ist und deshalb vernachlässigt werden kann.

Nachfolgend wird zunächst ein Schiff im unendlich breiten Fahrwasser betrachtet, um die Grundgleichungen der Geschwindigkeitsverteilung abzuleiten, um eine handhabbare Formel für die Einflussbreite b_E herzuleiten und um die lineare Abhängigkeit des Absunks $\Delta \bar{h}$ von der Rückströmungsgeschwindigkeit $\bar{v}_{rück}$ zu zeigen. Anschließend wird das einseitig (zum rechten Ufer hin) beschränkte Fahrwasser betrachtet, um das Spiegelungsprinzip zu erläutern, das schließlich auf allseits beschränktes Fahrwasser angewendet wird, woraus sich die allgemeine Beziehung der Abklingfunktion ergibt.

1) Schiff im unendlich breiten Fahrwasser

Approximation eines Schiffes durch eine Quell-/Senkenströmung

Die ebene Potentialströmung zwischen einer Quelle (logarithmisches Potential φ_1 , Quellstärke Q) und einer Senke (Potential φ_2), also eine Dipolströmung (Abstand der Pole a), formt, zusammen mit der Anströmung des Schiffes (Geschwindigkeit v_s aus der Sicht eines mit dem Schiff bewegten Beobachters, Potential φ_3), eine ellipsenförmige Stromlinie, die den Schiffsumriss approximieren soll, siehe untenstehende Skizze. Diese Stromlinie trennt den Bereich der Innenströmung zwischen den Polen (im Schiff gelegen) von der Außenströmung, also dem hier interessierenden Schiffsumströmungsfeld. Gemäß den Gesetzen von Potentialströmungen werden die Potenziale wie unten angegeben linear zum Gesamtpotential φ überlagert. Daraus werden die Strömungsgeschwindigkeiten durch Gradientenbildung erhalten.



Quelle (1):

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi} \ln r_1^2, r_1^2 = x^2 + y^2$$

Senke (2):

$$\varphi_2 = -\frac{Q}{4\pi} \ln r_2^2, r_2^2 = (a - x)^2 + y^2$$

Aufgeprägte Grundströmung (3):

$$\varphi_3 = v_s \cdot x$$

Superposition:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$$

Durch Ableiten der Gleichung für φ nach x ergibt sich die Geschwindigkeitskomponente in v_s – Richtung v_x . Um die zugehörige Rückströmungsgeschwindigkeit $v_{\text{rück}}$ (auch „Störströmungs-“, oder „Übergeschwindigkeit“ genannt) zu erhalten, die ein ortsfester Beobachter registriert, ist gemäß Definition die Schiffsgeschwindigkeit abzuziehen. Sie wird danach vom Quell- und Senkenterm bestimmt:

Störströmungsanteil $\bar{v}_{\text{rück}}$

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = v_s + \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{2x}{r_1^2} + \frac{2 \cdot (a - x)}{r_2^2} \right]$$

Für v_x in Schiffsmittte (bei $x = a/2$) ergibt sich daraus:

$$v_x \left(x = \frac{a}{2} \right) = v_s + \frac{Q}{\pi} \left(\frac{\frac{a}{2}}{\left(\frac{a}{2} \right)^2 + y^2} \right) \hat{=} v_s + \bar{v}_{\text{rück}}$$

Durch Integration dieser v_x – Verteilung über y ergibt sich eine Gleichung für den zugehörigen Abfluss. Dieser muss im Bereich der angenommenen Stromlinie, die die Innen- von der Außenströmung trennt, der Quellstärke Q entsprechen, denn die Quell-/Senkenströmung erzeugt ja via Verdrängung der Außenströmung das Schiff. Wenn nun gefordert wird, dass dies auf der Breite des Schiffes B der Fall ist, dann ergibt sich eine Bestimmungsgleichung für Q :

$$\frac{Q}{2} \triangleq \int_0^{B/2} v_x dy = v_s \frac{B}{2} + \frac{Q}{\pi} \int_0^{B/2} \frac{1}{1+\xi^2} d\xi, \quad \xi = \frac{y}{a/2}$$

Für das vorausgesetzte „schlanke Schiff“, also für $B \ll a$, ergibt sich für das o. a. Integral folgende Näherungsgleichung, aus der die Quell- und Senkenstärke Q folgt, die in dem betrachteten Querprofil in der Mitte zwischen Bug und Heck wie gefordert eine Stromlinie der Breite B erzeugt:

$$\int_0^{b/a} \frac{d\xi}{1+\xi^2} = \left. \arctan \xi \right|_0^{b/a} \approx \left. \xi \right|_0^{b/a} \approx \frac{b}{a}$$

$$\rightarrow \frac{Q}{2} \approx v_s \frac{B}{2} + \frac{Q B}{\pi a} \rightarrow Q \approx \frac{v_s \frac{B}{2}}{1 - \frac{B}{\pi a}} = \frac{v_s B}{1 - \frac{2B}{\pi a}} \approx v_s B$$

Um den erforderlichen Dipolabstand a zu bestimmen, der mit der Schiffslänge korrespondiert, ist als nächstes der Staupunkt im Abstand d vor und hinter den beiden Polen zu bestimmen. Hierfür gilt die folgende Staupunktbedingung:

$$v_x = 0 \quad \text{bei} \quad x = -d, y = 0$$

Hiermit und aus der o. a. Näherungsgleichung für Q ergibt sich aus der Gleichung für v_x die folgende Bestimmungsgleichung für d :

$$0 = v_s + \frac{v_s B}{4\pi} \left[\frac{-2d}{d^2} + \frac{2(a+d)}{(a+d)^2} \right]$$

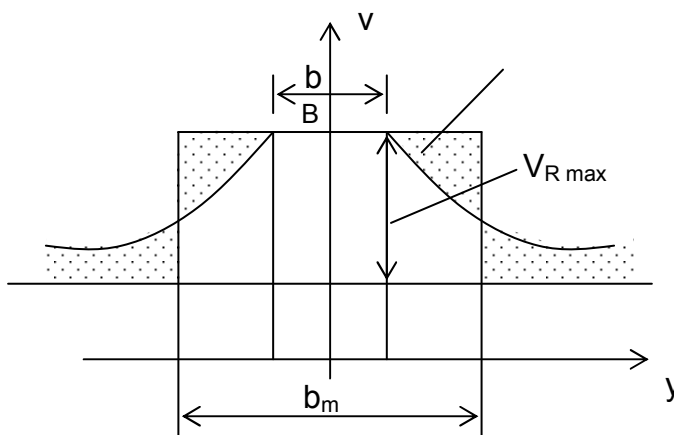
Für ein schlankes Schiff gilt $d \ll a$ und damit:

$$d \approx \frac{B}{2\pi} \quad \text{und} \quad l = a + 2d \approx a + \frac{B}{\pi} \quad \text{bzw.} \quad a \approx l - \frac{B}{\pi}$$

In dieser Gleichung ist l der Abstand vom Staupunkt am Bug bis zum Staupunkt am Heck. Bei einem ellipsenförmigen Schiff entspricht l damit der Schiffslänge. Für diesen Sonderfall können nun alle bisher unbekannten Kenngrößen in der Bestimmungsgleichung des ebenen Geschwindigkeitspotentials φ und damit der Rückströmgeschwindigkeitsverteilung $\bar{v}_{\text{rück}}(y)$ in Schiffsmitte angegeben werden, nämlich die Quellstärke Q und der Polabstand a .

Einflussbreite des Rückströmungsfeldes:

Mit den oben angegebenen Gleichungen ergibt sich u. a. die Rückströmungsgeschwindigkeit am Schiff $v_{\text{rück}}(y = B/2) = v_{R\text{max}}$. Unter Kanalbedingungen (Breitenfall „A“ in Kap. 5.5.1.1) ist dieser Wert über die Kanalbreite konstant und kann aus der eindimensionalen Kanaltheorie gemäß Kap. 5.5.3 errechnet werden. Letztere kann auch für den hier betrachteten, allgemeinen Fall einer ebenen Schiffsumströmung angewendet werden, wenn man sich den gesamten Abfluss, den das Rückströmungsfeld neben dem Schiff formt, auf einer noch zu bestimmenden Breite b_m zusammengefasst vorstellt und die Rückströmungsgeschwindigkeit dort den konstanten Maximalwert $v_{R\text{max}}$ annimmt. Wird dies vereinfachend wieder für die Schiffsmittle ($x = a/2$) angesetzt und wird die Schiffsbreite B berücksichtigt, auf der keine Rückströmung im Außenfeld auftritt, dann ergibt sich die Breite b_m gemäß folgender Skizze, die schematisch die Rückströmungsverteilung wiedergibt, aus der Bedingung, dass der gesamte Rückstrom auf der Querschnittsfläche $(b_m - B) \cdot h$ mit $v_{R\text{max}}$ abgeführt wird.



$$v_{R\text{max}} \cdot (b_m - B) = 2 \int_{B/2}^{\infty} \overbrace{(v_x - v_s)}^{\bar{v}_{\text{rück}}} dy$$

Mit dieser Bestimmungsgleichung für $v_{R\text{max}}$ kann nun die Integration über den gesamten, von der Rückströmung beeinflussten Bereich durchgeführt und quantitativ für ein schlankes Schiff ausgewertet werden, woraus sich die Breite b_m , auf der das Rückströmungsfeld zusammengefasst werden kann, ergibt. Diese Breite wird in Kap. 5.5.1.1 als Einflussbreite des Rückströmungsfeldes b_E bezeichnet:

$$v_{R\text{max}} = \bar{v}_{\text{rück}}\left(x = \frac{a}{2}, y = \frac{B}{2}\right) = \frac{Q}{\pi} \left[\frac{\frac{a}{2}}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \right] \approx \frac{2Q}{\pi a} \cdot \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{B}{a}\right)^2\right)} \approx \frac{2Q}{\pi a} \quad \text{für } B \ll a$$

$$\rightarrow \frac{2Q}{\pi a} (b_m - B) = \frac{2Q}{\pi} \int_{B/2}^{\infty} \frac{\frac{a}{2}}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + y^2} dy, \quad \zeta = \frac{y}{a}, \quad dy = a d\zeta$$

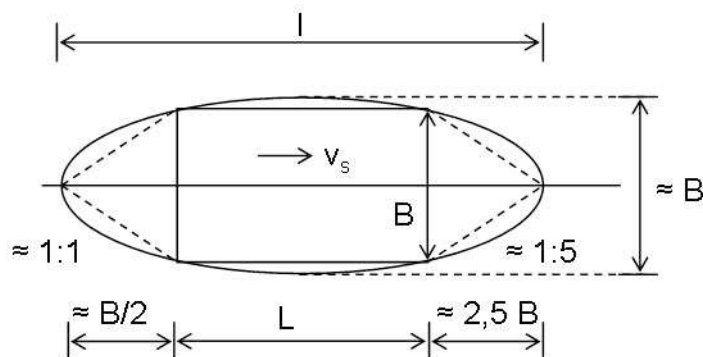
$$\rightarrow \frac{2Q}{\pi a} (b_m - B) = \frac{Q}{\pi} \int_{\frac{B}{2a}}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \zeta^2} d\zeta = \frac{Q}{\pi} \cdot 2 [\arctan(2\zeta)]_{\frac{B}{2a}}^{\infty} = \frac{2Q}{\pi} \left[\underbrace{\arctan \infty}_{\frac{\pi}{2}} - \underbrace{\arctan\left(\frac{b}{a}\right)}_{\approx \frac{B}{a} \text{ für } \frac{B}{a} \ll 1} \right]$$

$$\rightarrow \frac{2Q}{\pi a} (b_m - B) = \frac{2Q}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \frac{B}{a} \right]$$

$$\rightarrow b_m - B = a \cdot \left[\frac{\pi}{2} - \frac{B}{a} \right] \rightarrow b_m = \frac{\pi}{2} \cdot a = b_E$$

Approximation eines realen Binnenschiffes durch die Ellipse:

Da ein reales Binnenschiff im Grundriss nicht ellipsenförmig ist, müssen a bzw. l im Hinblick auf b_E mit den üblichen Schiffsabmessungen L und B verknüpft werden. Hierzu wird angenommen, dass sich die Strömung vor dem Schiff (in unten stehender Skizze links) im Winkel von 1 : 1 teilt und hinter dem Schiff, entsprechend einem Ablöswinkel von 1 : 5, wieder vereinigt. Daraus resultieren bei einem rechteckförmigen, schlanken Schiff folgende Beziehungen zwischen der Länge der Ellipse und den Schiffsabmessungen:



$$l \approx L + f \cdot B, \quad f_B \approx 3$$

Hieraus ergibt sich mit der aus der Staupunktbedingung abgeleiteten Beziehung zwischen l und a die gesuchte Gleichung für b_m bzw. b_E :

$$b_m = \frac{\pi}{2} a = \frac{\pi}{2} \left(l - \frac{B}{\pi} \right) \approx \frac{\pi}{2} \left[L + B \left(f_B - \frac{1}{\pi} \right) \right]$$

Wegen $1/\pi \ll f_B$ für ein im Grundriss rechteckiges Binnenschiff ergeben sich schließlich die gesuchten Beziehungen zwischen den Schiffsabmessungen und b_m sowie a . Dadurch kann die Abklingfunktion nunmehr quantitativ ausgewertet werden.

$$b_m \approx \frac{\pi}{2}(L + 3B) \text{ und}$$

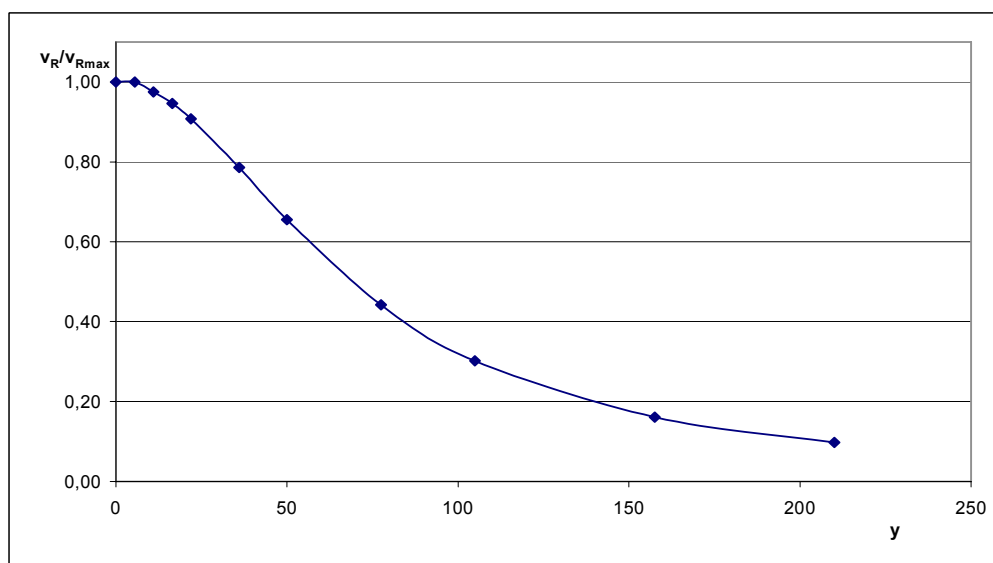
$$a \approx L + 3B$$

Dies sei am Beispiel eines 105 m langen und 11 m breiten GMS erläutert: Aus den Gleichungen für $\bar{v}_{\text{rück}}$ und $v_{R\text{max}}$ ergibt sich mit den vorgenannten Beziehungen eine Beziehung für das Verhältnis von $\bar{v}_{\text{rück}}$ und $v_{R\text{max}}$, die nur vom relativen, d.h. auf den Dipolabstand a bezogenen, Abstand $\zeta = y / a$ abhängt. Diese Beziehung wird auf das GMS angewendet und ist unten grafisch dargestellt.

$$0 \leq y < B/2 : v_R = 0 \quad (\text{ebenes Problem, } t_s \hat{=} h)$$

$$y = \frac{b_s}{2} : \frac{v_R}{v_{R\text{max}}} = 1,0$$

$$y > \frac{b_s}{2} : \quad \frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_{R\text{max}}} = \frac{\pi a}{2Q} \cdot \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{a}{2}\right)}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + y^2} = \frac{1}{4} \left(\left(\frac{1}{2}\right)^2 + (\zeta)^2 \right)^{-1}, \quad \zeta = \frac{y}{a}$$



Die glockenförmige Abklingfunktion im seitlich unbeschränkten Fahrwasser für das GMS kann danach grob durch folgende Anhaltswerte approximiert werden, um einzuschätzen, in welchem Umfang die Rückströmgeschwindigkeit zum Bemessungsufer hin abklingt.

$$\frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_{R\text{max}}} \approx \begin{cases} \frac{4}{5} & \text{bei ca. } y = 1/3 L \\ \frac{1}{2} & \text{bei ca. } y = 2/3 L \\ \frac{1}{3} & \text{bei } y = L \end{cases}$$

Linearität zwischen Absunk und Rückströmgeschwindigkeit

Um die v. g. Beziehungen zur Verteilung der Rückströmgeschwindigkeit neben dem Schiff für den zugehörigen Wasserspiegelabsunk $\Delta \bar{h}$ nutzen zu können, wird für die vorausgesetzte Bedingung $\Delta \bar{h} \ll h$ die Bernoullische Gleichung für Potenzialströmungen angewendet, wobei ein Punkt weit vor dem Schiff (Strömungsgeschwindigkeit = v_s) mit einem zweiten Punkt im Querprofil der Schiffsmittle, in dem v_x mit dem Betrag der resultierenden Geschwindigkeitsvektor identisch ist, verglichen wird:

$$\frac{v_s^2}{2g} + h = \frac{v_x^2}{2g} + h - \Delta \bar{h}; \quad v_x = v_s + \bar{v}_{\text{rück}}$$

$$\Delta \bar{h} = \frac{1}{2g} (v_x^2 - v_s^2) = \frac{v_s^2}{2g} \left(\left(\frac{v_x}{v_s} \right)^2 - 1 \right) = \frac{v_s^2}{2g} \left(\left(1 + \frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_s} \right)^2 - 1 \right)$$

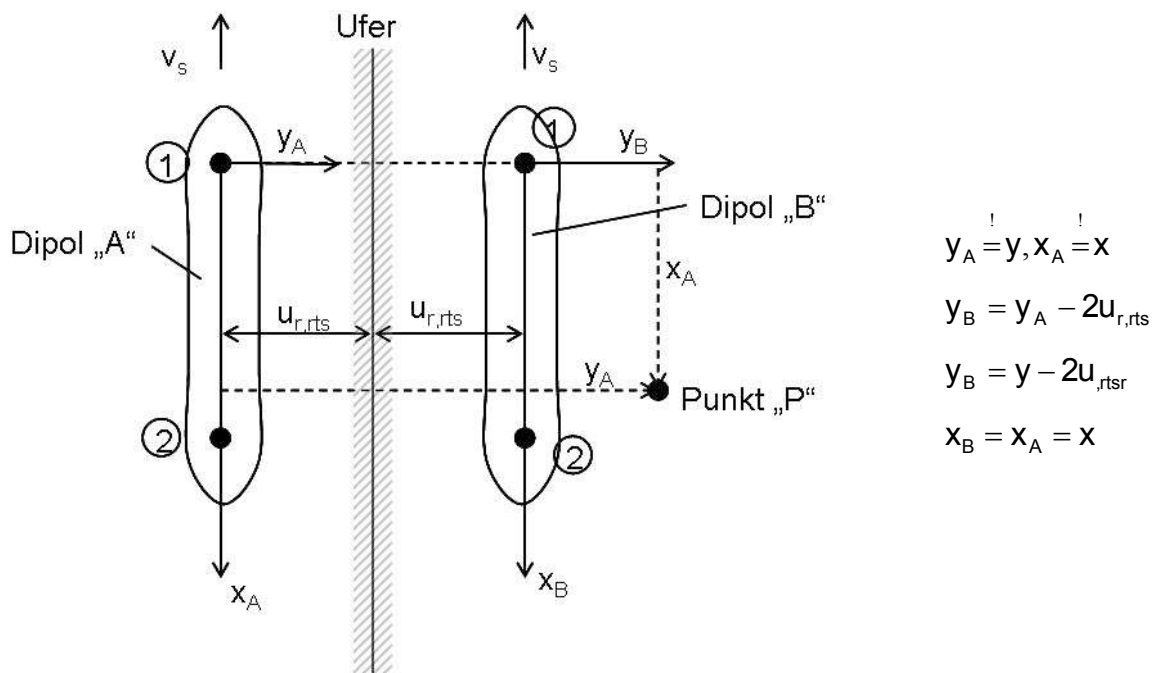
Für vorausgesetzte kleine Rückströmgeschwindigkeiten im Vergleich zur Schiffsgeschwindigkeit ist danach $\Delta \bar{h}$ direkt proportional zu $\bar{v}_{\text{rück}}$, woraus eine Gleichung für das Verhältnis des Absunkes im Abstand y von der Schiffsachse $\Delta \bar{h}$ zum Absunk am Schiff $\Delta \bar{h}_{\text{max}}$ resultiert. Wegen dieser Gleichung ist der Verlauf der Abklingfunktion im Bild 5.7 im Kap. 5.5.1.1 unter den o. g. Voraussetzungen für $\bar{v}_{\text{rück,u,rts}}$ und $\Delta \bar{h}_{\text{u,rts}}$ identisch.

$$\Delta \bar{h} \approx \frac{v_s^2}{2g} \cdot 2 \frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_s} \approx \frac{v_s \cdot \bar{v}_{\text{rück}}}{g}$$

$$\frac{\Delta \bar{h}}{\Delta \bar{h}_{\text{max}}} \approx \frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_{R \text{ max}}}$$

2) Schiff im einseitig beschränkten Fahrwasser

Wegen des Superpositionsprinzips von Potentialströmungen kann die Fahrt im seitlich eingeschränkten Fahrwasser gemäß folgender Skizze und unten stehenden Gleichungen durch Überlagerung der Strömungsfelder von zwei Schiffen, die spiegelgleich zur Uferlinie fahren, erfasst werden. Aus der Überlagerung ergibt sich am senkrecht angenommenen rechten Ufer eine Stromlinie. Für schräge Uferböschungen ist der zugehörige Uferabstand $u_{\text{r,rts}}$ dem Wert eines äquivalenten R-Profiles gemäß Bild 5.5 gleichzusetzen.



$$\varphi = v \cdot x + \varphi_{1A} + \varphi_{2A} + \varphi_{1B} + \varphi_{2B} \quad \text{und} \quad v_x = v + \frac{\partial}{\partial x} \sum \varphi$$

Hinweis: $u_{r,rts}$ und $u_{r,lrs}$ beschreiben den Abstand des Schiffes zum Ufer und müssen daher beide positiv sein.

Für schlanke Schiffe, also für $B \ll a$, kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass die Randbedingungen, die für das Schiff im beidseitig unbeschränkten Fahrwasser gelten, d. h., dass die geschlossene Stromlinie, die das Schiff formt, weiterhin im Abstand $y = \pm B/2$ und der Staupunkt bei $x = \pm d$ liegen, auch bei der Superposition erfüllt sind. Für $x = a/2$ gelten dann näherungsweise für den Abfluss zwischen den beiden Dipolen A und B, die das Strömungsfeld formen, für die zugehörigen überlagerten Rückströmungsgeschwindigkeiten und schließlich für das Verhältnis der Geschwindigkeiten im Abstand y vom Schiff zum Wert am Schiff folgende Gleichungen:

$$Q_A = Q_B \approx \frac{v_s B}{1 - \frac{2B}{\pi a}} \approx v_s \cdot B \triangleq Q$$

$$\bar{v}_{\text{rück}} \approx \frac{Q}{\pi} \frac{\left(\frac{a}{2}\right)}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + y^2} + \frac{Q}{\pi} \frac{\left(\frac{a}{2}\right)}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (y - 2u_{r,rts})^2}$$

$$\bar{v}_{\text{rück}} \approx \frac{Qa}{2\pi} \left[\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + y^2} + \frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (y - 2u_{r,rts})^2} \right]$$

$$v_{Rmax} \approx \frac{Qa}{2\pi} \left[\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} + \frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2} - 2u_{r,rts}\right)^2} \right]$$

$$\frac{\bar{v}_{rts}}{v_{Rmax}} = \frac{\left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + y^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (y - 2u_{r,rts})^2 \right]^{-1}}{\left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{B}{2} - 2u_{r,rts}\right)^2 \right]^{-1}}$$

Mit Einführung der folgenden Definitionen kann die Gleichung für die Abklingfunktion $\bar{v}_{rück} / v_{Rmax}$ dimensionslos geschrieben werden. Als skalierende Länge wurde dabei der Dipolabstand a gewählt.

$$\zeta = \frac{y}{a}, \quad u_{r,rts} = \delta_r a, \quad B = \varepsilon a$$

Hieraus folgt, dass die Abklingfunktion, neben dem relativen, d. h. auf a bezogenen Abstand y , nur noch von zwei weiteren Kenngrößen abhängt: Dem relativen Uferabstand δ_r und der relativen Schiffsbreite ε (der Schlankheit des Schiffes)

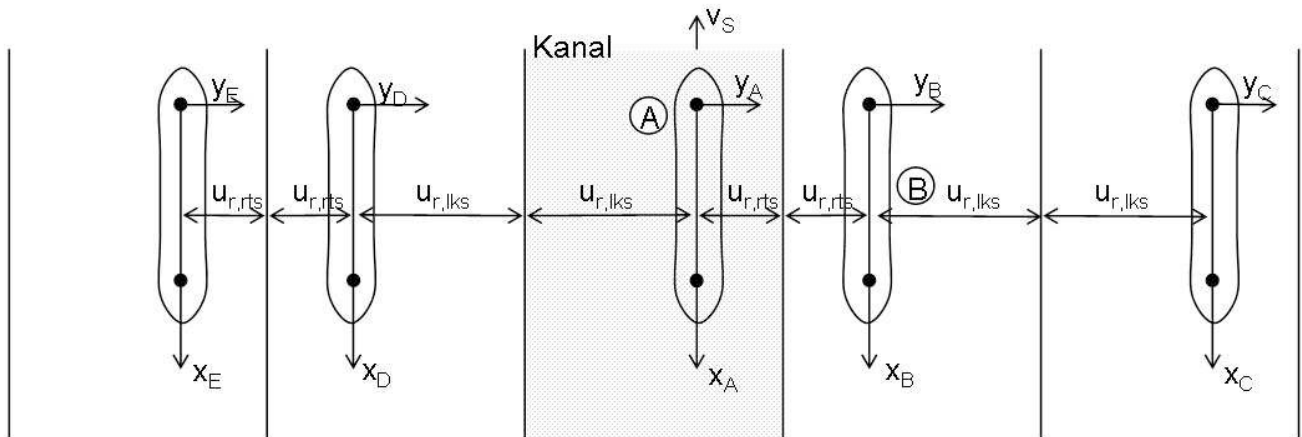
$$\frac{\bar{v}_{rück}}{v_{Rmax}} = \frac{\left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \zeta^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 + (\zeta - 2\delta_r)^2 \right]^{-1}}{\left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} - 2\delta_r\right)^2 \right]^{-1}} \approx \frac{\Delta \bar{h}}{\Delta \bar{h}_{max}}$$

Angewendet auf ein 105 m langes und 11 m breites GMS ($a = 138$ m, $\varepsilon = 0,10$) ergibt sich aus dieser Gleichung z. B. für ein Ufer, das um die Schiffslänge entfernt liegt ($\zeta = \delta_r = 0,76$) ein Wert der Abklingfunktion von 0,57. Im unendlich breiten Fahrwasser hätte der zugehörige Wert, wie oben dargelegt, 0,30 betragen. Bei ufernaher Fahrt klingt das Rückströmungsfeld somit viel schwächer ab als ohne Ufereinfluss.

3) Schiff fährt im allseits beschränkten Fahrwasser (Kanal)

Auch für beidseitig eingeschränktes Fahrwasser kann das Spiegelungsprinzip angewendet werden. Um die erwünschten Stromlinien an den beiden Ufern zu erzeugen, muss gemäß unten stehender Skizze die vorher beschriebene Spiegelung am rechten Ufer mit Dipol B zunächst zum linken Ufer wiederholt werden. Dies geschieht durch den Dipol D, der aber gleichzeitig ein Störpotenzial am rechten Ufer erzeugt, das die Stromlinie dort durch die Verdrängungswirkung des Schiffes D nach rechts verbiegt. Um diesen Effekt zu kompensieren, kann ein Dipol C hinzugefügt werden, der die Verdrängungswirkung des Dipols D kompensiert, nun aber wieder die Stromlinie des linken Ufers verbiegt, wodurch ein weiterer Dipol an Position E angeordnet werden sollte. Diese Betrachtung zeigt, dass die

Stromlinien am linken und rechten Ufer nur mit unendlicher Fortsetzung des Spiegelungsprinzips erzeugt werden können. Dennoch soll zunächst die Superposition von 5 Dipolen gemäß unten stehender Skizze und den zugehörigen geometrischen Randbedingungen betrachtet werden, woraus sich in Analogie zur einfachen Superposition die folgende Gleichung für die Abklingfunktion ergibt:



$$x_A = x_B = x_C = x_D = x_E = \frac{a}{2}$$

$$y_A = y, y_B = y_A - 2u_{r,rts} = y - 2u_{r,rts}, y_C = y_A - 2(u_{r,rts} + u_{r,lks}), y_D = y_A + 2u_{r,lks}, y_E = y_A + 2(u_{r,lks} + u_{r,rts})$$

$$\zeta = \frac{y}{a}, \varepsilon = \frac{B}{a}, \delta_r = \frac{u_{r,rts}}{a}, \delta_l = \frac{u_{r,lks}}{a}$$

$$\frac{v_R}{v_{Rmax}} = \frac{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \zeta^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\zeta - 2\delta_r)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\zeta - 2\delta_l - 2\delta_r)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\zeta + 2\delta_l)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\zeta + 2\delta_l + 2\delta_r)^2 \right]^{-1}}{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} - 2\delta_r \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} - 2\delta_l - 2\delta_r \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} + 2\delta_l \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} + 2\delta_l + 2\delta_r \right)^2 \right]^{-1}}$$

Im Standard-R-Profil (Breite 42 m) gemäß Richtlinien für Regelquerschnitte ergibt sich nach dieser Gleichung für das schon mehrfach betrachtete GMS bei mittlerer Fahrt ein Wert für die Abklingfunktion von 0,99. Dies zeigt, dass die Rückströmgeschwindigkeit im Kanalfall tatsächlich in etwa konstant ist.

Für eine weitere Spiegelung kommt in der vorgenannten Gleichung im Zähler folgender Term hinzu:

$$\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\xi - 4\delta_r - 2\delta_l)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\xi + 4\delta_l + 2\delta_r)^2 \right]^{-1}$$

Im Nenner ergibt sich entsprechend:

$$\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} - 4\delta_r - 2\delta_l \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} + 4\delta_l + 2\delta_r \right)^2 \right]^{-1}$$

Eine weitere Spiegelung erfordert folgende Ergänzungen:

$$\text{Zähler: } \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\xi - 4\delta_l - 4\delta_r)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (\xi + 4\delta_l + 4\delta_r)^2 \right]^{-1}$$

$$\text{Nenner: } \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} - 4\delta_l - 4\delta_r \right)^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{2} + 4\delta_l + 4\delta_r \right)^2 \right]^{-1}$$

Hieraus ist das Bildungsgesetz für n Spiegelungen erkennbar. Mit den nachstehenden Definitionen ergibt sich schließlich eine allgemeingültige Gleichung für die Abklingfunktion, mit der die Diagramme gemäß Bild 5.7 errechnet wurden.

Sie ist exakt gültig für $n \rightarrow \infty$. Für die numerische Auswertung genügen i. d. R. schon wenige Spiegelungen. Deshalb bietet es sich an, die Formel für sukzessiv vergrößerte n anzuwenden, bis sich der gesuchte Funktionswert nicht mehr signifikant ändert.

$$\frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_{R\max}} = \frac{\Phi(\zeta)}{\Phi(\zeta_0)}, \quad \text{mit } \zeta = \frac{y}{a}, \quad \zeta_0 = \frac{B}{2a} = \frac{\varepsilon}{2}, \quad \delta_l = \frac{u_{r,lks}}{a}, \quad \delta_r = \frac{u_{r,rts}}{a}$$

$$\begin{aligned} \Phi(\zeta) = & \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + \zeta^2 \right]^{-1} + \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + [\zeta - 2(n-1)\delta_l - 2n\delta_r]^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + [\zeta - 2n\delta_l - 2(n-1)\delta_r]^2 \right]^{-1} \right\} \\ & + \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + [\zeta + 2n\delta_l + 2(n-1)\delta_r]^2 \right]^{-1} + \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + [\zeta + 2(n-1)\delta_l + 2n\delta_r]^2 \right]^{-1} \right\} \end{aligned}$$

4) Breite des äquivalenten Kanalprofils

Analog zur Definition der Einflussbreite des Rückströmungsfeldes kann auch im allgemeinen Fall des allseits beschränkten Fahrwassers eine Kanalbreite $b_{r,\text{äqui}}$ definiert werden, in der man sich das gesamte Rückströmungsfeld konzentriert vorstellen kann, wenn es auf dieser Breite den Maximalwert am Schiff annimmt. Hieraus folgt die nachstehende Gleichung, bei der für angenommene schlanke Schiffe wieder das Rückströmungsfeld unter dem Schiff vernachlässigt wird.

$$v_{R\max} \cdot (b_{r,\text{äqui}} - B) = \int_{-\frac{B}{2}}^0 \bar{v}_{\text{rück}}(y) dy + \int_0^{\frac{B}{2}} \bar{v}_{\text{rück}}(y) dy$$

Mit den Definitionen $\zeta = \frac{y}{a}$ und $\varepsilon = \frac{B}{a}$ ergibt sich daraus:

$$\frac{b_{r,\text{äqui}}}{a} = \varepsilon + \int_{-\frac{\varepsilon}{2}}^0 \frac{\Phi(\zeta)}{\Phi(\zeta_0)} d\zeta + \int_0^{\frac{\varepsilon}{2}} \frac{\Phi(\zeta)}{\Phi(\zeta_0)} d\zeta$$

In GBBSOft werden die beiden oben angegebenen Integrale in der Gleichung für $b_{r,\text{äqui}}$ numerisch ausgewertet, wobei eine ausreichende Genauigkeit im Kanalfall ($b_r \leq b_E$) durch Einteilung in je 50 gleich große Intervalle und Anwendung der Trapezregel erreicht wird. Für breite Kanäle ($b_r > b_E$) wird die Anzahl der Integrationsintervalle n_i pro Schiffseite in GBBSOft wie folgt gewählt:

$$n_i = 50 \, b_r / b_E$$

Für einen Kanal der Breite $b_{r,\text{äqui}}$ kann nun die eindimensionale Kanaltheorie zur Berechnung des Absunks Δh und der Rückströmgeschwindigkeit $\bar{v}_{\text{rück}}$ angewendet werden. Letztere entsprechen gemäß Definition von $b_{r,\text{äqui}}$ den Maximalwerten am Schiff. Sie sind deshalb gemäß Abklingfunktion

$\frac{\bar{v}_{\text{rück}}}{v_{R,\text{max}}} = \frac{\Phi(\zeta)}{\Phi(\zeta_0)}$ vom Schiff zum Ufer hin zu modifizieren, um die korrespondierenden Werte am Bemessungsufer zu erhalten.

**Anhang E: Allgemeine Strahlausbreitung für die Standardsituationen 1 und 2
und für $v_s = 0$**

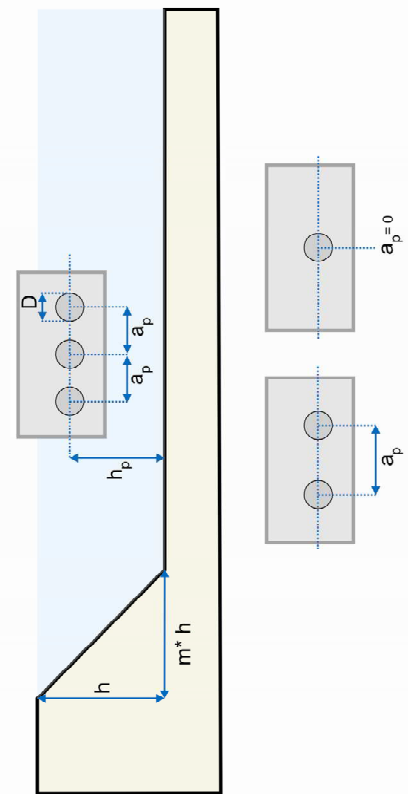
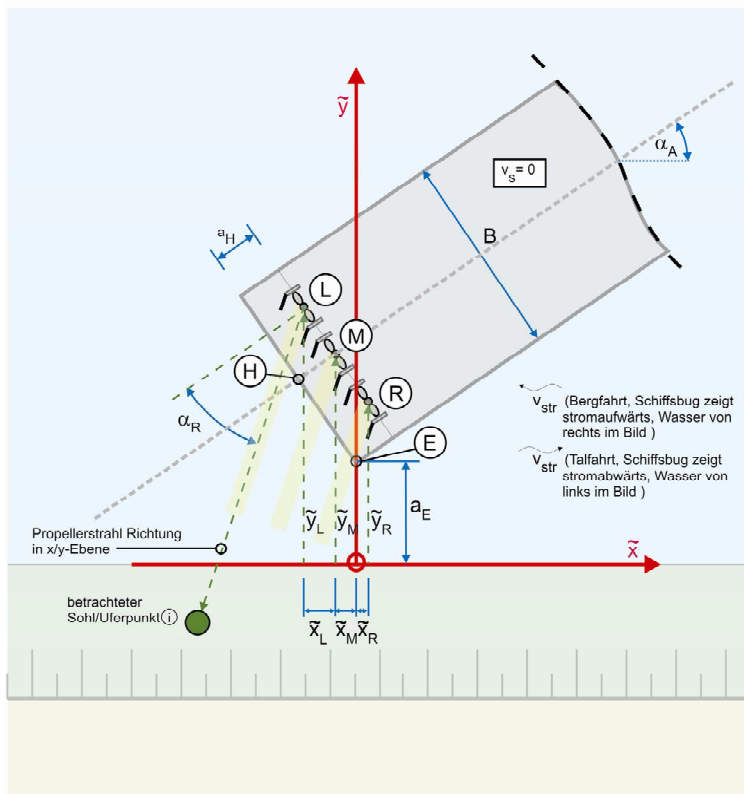
zu 5.6.3.4 Mehrschraubenantriebe

Analog zur Vorgehensweise in 5.6.3.4 wird nachfolgend ein Berechnungsverfahren für die Überlagerung mehrerer Propellerstrahlen bei beliebiger Position des Schiffes in Bezug auf die Uferböschung angegeben. Bei gegebenem v_0 gemäß 5.6.1 verwendet es die Gl.n (5-100) bis (5-101) für die Abnahme der Zentralgeschwindigkeit entlang der Strahlachse, wobei von einer seitlich und in Strahlrichtung unbehinderten Strahlausbreitung gemäß Standardsituationen 1 und 2 ausgegangen wird (entsprechend $a = 0,6$ in Gl. (5-94) und A nach Gl. (5-95) oder (5-96). Die Geschwindigkeitsverteilung im Einzelstrahl wird nach Gl. (5-98) berechnet. Das Berechnungsverfahren berücksichtigt somit weder die Umlenkung des Strahls bei schrägem oder senkrechtem Auftreffen des Strahls auf das Ufer noch die gegenseitige Interaktion der Teilstrahlen. Die Überlagerung der Teilstrahlen erfolgt somit unabhängig von der Sohl- bzw. Ufernähe. Die linear überlagerten Geschwindigkeiten werden gewissermaßen nur auf das Ufer bzw. die Sohle projiziert, woraus eine Belastungsfläche wie beim Lichtstrahl einer oder mehrerer Taschenlampen resultiert. Trotz dieser Vereinfachungen gibt das Berechnungsverfahren Hinweise, an welcher Stelle die größten Sohlbelastungen auftreten und ob und in welchem Umfang sich die Teilstrahlen eines Mehrschraubenantriebs überlagern.

Die Überlagerung der Teilstrahlen an jedem betrachteten Sohl- bzw. Uferpunkt erfolgt vektoriell. Die induzierte Anfangsgeschwindigkeit v_0 sowie die Zentralgeschwindigkeit $v_{x\max}$ sind ebenfalls Vektoren, die gemäß folgenden Skizzen (geometrische Randbedingungen und Darstellung eines Teilstrahls) in Abhängigkeit vom Ablegewinkel α_A des Schiffes und dem Strahlablenkungswinkel α_R durch die Ruderanlagen den Winkel β_S zwischen Ufernormale und Strahlachse definieren. Weiterhin können die Strahlvektoren \vec{v}_0 und $\vec{v}_{x\max}$ der maximal drei auf gleicher Höhe über der Sohle angeordneten Einzelpropeller um den Winkel α_S zur Sohle hin geneigt sein. Er entspricht hierbei dem Winkel α_0 zwischen Propellerachse und Strahlachse in Bild 5.26 in 5.6.3.1.

Aufgrund der vektoriellen Betrachtung muss auch der Strahlgeschwindigkeit im Abstand r_x von der Strahlachse gemäß Gl. (5-98) eine Richtung zugeordnet werden. Sie wird der Richtung der Strahlachse gleichgesetzt.

Mit diesen Annahmen reduziert sich die Strahlüberlagerung auf geometrische Beziehungen, die nachfolgend skizziert sind. Da vorab nicht bekannt ist, an welcher Stelle an Sohle oder Ufer die größten Belastungen auftreten, muß i. d. R. eine große Anzahl potenzieller Sohl- bzw. Uferpunkte betrachtet werden, woher sich eine Rasterung der Gewässerberandung empfiehlt. Dies wurde in GBBSoft umgesetzt.



Geometrische Randbedingungen eines Schiffes in Bezug zur Uferböschung. Die in GBBSoft vorzuziehenden Werte sind im Folgenden fett hervorgehoben.

L, M, R Linker, mittlerer und rechter Propeller

E der Böschung zugekehrte Ecke des Schiffes (ufernächster Punkt)

H Heckmitte

a_E horizontal gemessener Abstand des ufernächsten Punkts des Schiffes zum Böschungsfuß

a_H Abstand der Propellerebene vom Heckspiegel

α_A Ablegungswinkel ($\leq 45^\circ$)

α_R Ablenkungswinkel durch das Ruder ($\leq 75^\circ$)

\tilde{x}_L, \tilde{y}_L Koordinaten des linken Propellers

\tilde{x}_M, \tilde{y}_M - " - mittleren - " -

\tilde{x}_R, \tilde{y}_R - " - rechten - " -

B Schiffsbreite

h_p Höhe Propellerachse über Sohle [m]

n_p Anzahl Propeller

j Zähler des Propellers (j = 1 - max. 3 Propeller)

a_p horizontaler Abstand der Propeller untereinander (bei nur einem vorhandenen Propeller ist $a_p = 0$)

m Böschungsneigung

h Wassertiefe

v_{Str} Strömungsgeschwindigkeit

D Propellerdurchmesser

Die nachfolgenden Beziehungen bauen auf die vorangegangene Skizze auf. Sie definieren zunächst die geometrischen Randbedingungen des Schiffes mit Ablegewinkel, Strahlablenkungswinkel und Abstand des nächsten Schiffspunkts zum Böschungsfuß, wobei der Lotfußpunkt dieser Geraden auf dem Böschungsfuß als Koordinatenursprung gewählt wurde, auf den auch die Propellerpositionen bezogen werden.

- Koordinaten des ufernächsten Eckpunktes E und des Heckmittelpunktes H des Schiffes:

$$\text{Eckpunkt: } \tilde{x}_E = 0, \quad \tilde{y}_E = a_E$$

$$\text{Heckmittelpunkt: } \tilde{x}_H = \tilde{x}_E - \frac{B}{2} \sin \alpha_A, \quad \tilde{y}_H = \tilde{y}_E + \frac{B}{2} \cos \alpha_A$$

- Koordinaten des Propellers bei 1-Schraubern und des mittleren Propellers bei 3-Schraubern:

$n_p = 1 \text{ oder } 3$:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_M &= \tilde{x}_H + a_H \cos \alpha_A & \text{für } n_p = 1: \quad \tilde{x}_1 &\hat{=} \tilde{x}_M, \quad \tilde{y}_1 \hat{=} \tilde{y}_M \\ \tilde{y}_M &= \tilde{y}_H + a_H \sin \alpha_A & n_p = 3: \quad \tilde{x}_2 &\hat{=} \tilde{x}_M, \quad \tilde{y}_2 \hat{=} \tilde{y}_M \end{aligned}$$

- Koordinaten des rechten Propellers bei 2- oder 3-Schraubern:

$n_p = 2 \text{ oder } 3$:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_R &= \tilde{x}_M + a_p \frac{n_p - 1}{2} \sin \alpha_A & \text{für } n_p = 2 \text{ und } n_p = 3: \\ \tilde{y}_R &= \tilde{y}_M - a_p \frac{n_p - 1}{2} \cos \alpha_A & \tilde{x}_1 \hat{=} \tilde{x}_R, \quad \tilde{y}_1 \hat{=} \tilde{y}_R \end{aligned}$$

- Koordinaten des linken Propellers bei 2- oder 3-Schraubern:

$n_p = 2 \text{ oder } 3$:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_L &= \tilde{x}_M - a_p \frac{n_p - 1}{2} \sin \alpha_A & \text{für } n_p = 2: \quad \tilde{x}_2 \hat{=} \tilde{x}_L, \quad \tilde{y}_2 \hat{=} \tilde{y}_L \\ & & n_p = 3: \quad \tilde{x}_3 \hat{=} \tilde{x}_L, \quad \tilde{y}_3 \hat{=} \tilde{y}_L \\ \tilde{y}_L &= \tilde{y}_M + a_p \frac{n_p - 1}{2} \cos \alpha_A \end{aligned}$$

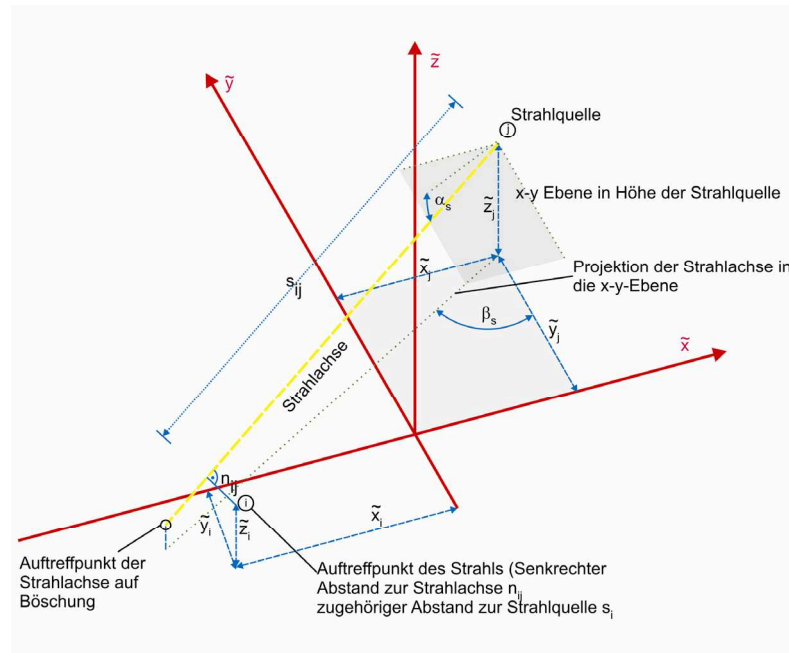
Hiermit sind nun die Koordinaten der Propellerstrahlquellen bekannt und es können die Auftreffpunkte des Strahls und der Strahlachse auf der Sohle oder der Böschung für jeden Propeller sowie der maximale Betrag der superponierten Strahlgeschwindigkeit berechnet werden.

Zunächst wird hierfür der erwartete Auftreffpunkt des Schwerpunktes der einzelnen Propellerstrahlen (Koordinaten \tilde{x}_A und \tilde{y}_A) an der Sohle nach Gl. (5-102) berechnet, wobei s_A der Lage in x-Richtung $x_{S,max}$ aus der genannten Gleichung entspricht.

$$\tilde{x}_A = \tilde{x}_M - s_A \sin \beta_S \cdot \cos \alpha_S$$

$$\tilde{y}_A = \tilde{y}_M - s_A \cos \beta_S \cdot \cos \alpha_S$$

Von dieser Position aus wird in GBBSOft ein Raster aufgespannt, dessen äußere Abmessungen so gewählt werden, dass das erwartete Strahlggeschwindigkeitsmaximum erfasst ist.



Koordinaten eines Teilstrahls mit Auftreffpunkt am Ufer

β_s Strahlwinkel zur Böschungsnormalen ($= 90^\circ - \alpha_A - \alpha_R$)

α_s Neigung der Strahlachse zur Horizontalen

$\tilde{x}_j, \tilde{y}_j, \tilde{z}_j$ Koordinaten der Strahlquelle (des Propellers) j

$\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i$ Koordinaten des Auftreffpunktes

i Nummer des betrachteten Sohl- bzw. Uferpunktes (Auftreffpunktes)

s_{ij} Abstand des Auftreffpunktes i von der Strahlquelle, gemessen entlang der Strahlachse

n_{ij} Senkrechter Abstand des Auftreffpunktes i von der Strahlachse

Aus der obigen Skizze ergeben sich nun die Geradengleichungen des jeweils betrachteten Strahls der Strahlquelle j (entsprechend der Propeller 1 bis 3) und die Abstandsgleichung eines Ufer- bzw. Sohlpunktes i zur Strahlachse. Ein beliebiger Punkt mit den Koordinaten \tilde{x} , \tilde{y} und \tilde{z} auf der Strahlachse wird daher vom Abstand s der Strahlquelle abhängig gemacht.

- Geradengleichung des Strahls in Parameterform

$$\tilde{x} = \tilde{x}_j - s \cdot \sin \beta_s \cos \alpha_s$$

$$\tilde{y} = \tilde{y}_j - s \cdot \cos \beta_s \cos \alpha_s$$

$$\tilde{z} = \tilde{z}_j - s \cdot \sin \alpha_s$$

- Abstand a eines Punktes $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ auf der Strahlachse zum Ufer- bzw. Sohlpunkt i

$$\begin{aligned} a^2 &= (\tilde{x}_i - \tilde{x})^2 + (\tilde{y}_i - \tilde{y})^2 + (\tilde{z}_i - \tilde{z})^2 \\ &= (\tilde{x}_i - \tilde{x}_j + s \cdot \sin \beta_s \cos \alpha_s)^2 + (\tilde{y}_i - \tilde{y}_j + s \cdot \cos \beta_s \cos \alpha_s)^2 + (\tilde{z}_i - \tilde{z}_j + s \cdot \sin \alpha_s)^2 \end{aligned}$$

Hiermit lassen sich die Größen r_x (entspricht hier n_{ij}) und x (hier s_{ij}) zur Bestimmung der Strahlgeschwindigkeitsverteilung entlang ($v_{x\max}$) und quer (v_{xr}) zur Strahlachse nach Gl.n (5-101) und (5-98) berechnen. Der Index x der Größen r_x , $v_{x\max}$ und v_{xr} steht in diesem Fall für die Stelle x auf der Strahlachse und hat nichts mit der \tilde{x} -Koordinate zu tun. Der Abstand r_x in Gl. (5-98) entspricht dem minimalen Abstand n_{ij} des jeweiligen betrachteten Punktes i zur Strahlachse in der Entfernung x bzw. s_{ij} von der Propellerebene. Diese Entfernung s_{ij} des betrachteten Punktes i von der Propellerebene ergibt sich somit durch Differenzieren der oben genannten Gleichung für a nach s aus folgender Bedingung: $\frac{da}{ds} = 0$ (für $a \neq 0$). Hieraus folgt:

$$s_{ij} = \frac{(\tilde{x}_j - \tilde{x}_i) \sin \beta_S \cos \alpha_S + (\tilde{y}_j - \tilde{y}_i) \cos \beta_S \cos \alpha_S + (\tilde{z}_j - \tilde{z}_i) \sin \alpha_S}{\sin^2 \beta_S \cos^2 \alpha_S + \cos^2 \beta_S \cos^2 \alpha_S + \sin^2 \alpha_S}$$

Mit $s = s_{ij}$ ergibt sich daraus n_{ij} aus der vorgenannten Gleichung für a mit $n_{ij} \triangleq a(s_{ij})$. Die Geschwindigkeit in der Strahlachse im Abstand s_{ij} $v_{x\max,ij}$ ergibt sich nun aus den Gl.n (5-91) bis (5-96), wobei die hier verwendeten Größen $v_{x\max,ij}$ und s_{ij} in diesen Gleichungen den Werten $v_{x\max}$ und x entsprechen. Nach Gl. (5-98) ergibt sich mit $r_x \triangleq n_{ij}$ daraus der Betrag der Strahlgeschwindigkeit v_{xrij} im Sohl-/Uferpunkt i :

$$v_{xrij} = v_{x\max,ij} \cdot e^{-22,2 \left(\frac{n_{ij}}{s_{ij}} \right)^2}$$

Hierbei ist $v_{x\max,ij}$ die Zentralgeschwindigkeit bei behinderter Strahlausbreitung nach Gl.n (5-91) bis (5-96) mit zugehörigem a , A.

Unter Beachtung der angenommenen Strahlrichtung ergeben sich daraus die Komponenten der Strahlgeschwindigkeit in \tilde{x} -, \tilde{y} - und \tilde{z} -Richtung:

$$v_{xrij,\tilde{x}} = -v_{xrij} \sin \beta_S \cos \alpha_S$$

$$v_{xrij,\tilde{y}} = -v_{xrij} \cos \beta_S \cos \alpha_S$$

$$v_{xrij,\tilde{z}} = -v_{xrij} \sin \alpha_S$$

Die resultierende, superponierte Strahlgeschwindigkeit v_{xrij} relativ zu Sohle/Ufer für $j = 1$ bis maximal 3 Propellerstrahlen errechnet sich dann aus:

$$v_{xrij} = \sqrt{\left(\sum_j (v_{xrij,\tilde{x}} \mp v_{Str})^2 + \sum_j (v_{xrij,\tilde{y}})^2 + \sum_j (v_{xrij,\tilde{z}})^2 \right)}$$

Bergfahrt (Fahrt gegen die Strömung) : $+v_{Str}$

Talfahrt (Fahrt in Richtung der Strömung) : $-v_{Str}$

Diese Berechnung wird für alle Rasterpunkte durchgeführt und es wird das Maximum der errechneten Werte v_{xrij} gesucht. Diese Größe wird gleichgesetzt mit $v_{\max,S}$ zur Anwendung in Gl. (6-3) und v_{\max} zur Anwendung in Gl. (6-8), unter Verwendung der geometrischen Beziehungen zum Einfluss der Strahlrichtung relativ zur Böschung nach Gl. (6-4), genutzt. Dabei wird β_{St} der Richtung im gefundenen Maximum der Strahlgeschwindigkeit gleichgesetzt.

$$\beta_{St} = \arctan \left(\frac{v_{xrij,\tilde{y}}}{v_{xrij,\tilde{x}} \mp v_{Str}} \right)$$